

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y AMBIENTALES



**TRABAJO FINAL DE MÁSTER: PERFIL INVESTIGADOR
MÁSTER EN GESTIÓN INTEGRADA DE ÁREAS LITORALES
(GIAL)**



**Influencia del aumento del nivel del mar en las marismas de Urdaibai,
País Vasco.**

**Influence of sea level rise on the Urdaibai saltmarshes, Basque
Country.**

Memoria presentada por Beñat Egidazu de la Parte para la obtención del título de
Máster en Gestión Integrada de Áreas Litorales (GIAL) por la Universidad de Cádiz.

En Puerto Real, a 20 de septiembre de 2021

Este Trabajo Final de Máster se ha realizado al amparo
del Campus de Excelencia Internacional del Mar (CEI-MAR)

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Gloria y María por su interés e implicación. Muchas gracias por involucraros tanto en el trabajo e intentar sacar lo mejor de ello.

Quiero agradecer también a todo el equipo de ARIES por hacerme sentir como en casa desde el primer momento y querer que este trabajo sea, de alguna manera, parte de un proyecto tan complejo y a la vez interesante. En especial, quiero agradecer a Marta Pascual por darme la oportunidad de mostrar lo que estaba haciendo a distintas personas de diferentes cargos y países.

Por último, me gustaría agradecer a Manu Monge por aquellas conversaciones que tuvimos antes de que empezará todo esto. Gracias por echarme una mano en como se debía de aplicar la metodología en el caso de estudio de Urdaibai.

RESUMEN

Las retroalimentaciones entre la concentración de sedimentos, la absorción de sedimentos por las plantas, la acumulación de materia orgánica bajo el suelo, la productividad de las especies halófilas y la exposición a las inundaciones determinan el funcionamiento y la evolución de las marismas costeras. Esto, junto con la situación actual de aumento del nivel del mar y la ocupación de las zonas costeras, amenazan el destino de estos valiosos ecosistemas. El presente estudio pretende evaluar el destino potencial de las marismas de Urdaibai (País Vasco) bajo diferentes escenarios de subida del nivel del mar y diferentes proyecciones temporales, y poner los resultados a disposición del público en general. Para ello, este trabajo desarrolla un modelo predictivo que tiene en cuenta las interacciones eco-geomórficas de las variables mencionadas anteriormente. Los resultados sugieren que la zona de estudio presentará un aumento de la superficie de la marisma en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 junto con un aumento de la exposición a las inundaciones del sistema. Los resultados también sugieren que esta evolución de la marisma se apoya principalmente en la capacidad de *Halimione portulacoides* para modificar las tasas de deposición, facilitando las condiciones ecológicas para el desarrollo de *Juncus maritimus*. Estos resultados están disponibles en la herramienta SIG online https://benategidazu.github.io/Parcelas_Afectadas_App/, donde se puede consultar el destino de la zona en los escenarios estudiados. Las incertidumbres de este modelo son altas debido a la baja calidad de la información disponible. Sin embargo, el aumento de la calidad de la información que alimenta el modelo y el conocimiento de las interacciones interespecíficas de las especies de las marismas podría mejorar estas incertidumbres.

ABSTRACT

The feedbacks between sediment concentration, sediment uptake by plants, accumulation of below ground organic matter, productivity of halophyte species and exposure to flooding determine the functioning and evolution of coastal marshes. This together with the current situation of sea level rise and occupation of coastal areas threaten the fate of such valuable ecosystems. The present study aims to evaluate the potential fate of the Urdaibai saltmarshes (Basque Country) under different scenarios of sea level rise and different time projections, and make available the results to the general public. To do so this work develops a predictive model that takes into account the eco-geomorphic interactions of the variables mentioned above. The results suggest that the study area will present an increase in the marsh area in the climate change scenarios RCP 4.5 and RCP 8.5 together with an increase in the exposure to flooding of the system. The results also suggest that this saltmarsh evolution is mainly supported

by the capacity of *Halimione portulacoides* to modify deposition rates, facilitating the ecological conditions for the development of *Juncus maritimus*. These results are available in the online GIS tool https://benategidazu.github.io/Parcelas_Afectadas_App/, where the fate of the area in the studied scenarios can be consulted. The uncertainties of this model are high due to the low quality of available information. However, increasing the quality of information feeding the model and the knowledge on interspecific interactions of saltmarsh species could improve these uncertainties.

Índice

1.	Introducción	3
2.	Ámbito de estudio	10
3.	Objetivos	12
3.1.	Objetivos específicos	12
4.	Material y métodos	13
4.1.	Cartografía	13
4.2.	Especies halófitas	15
4.3.	El modelo predictivo	16
4.3.1.	Variables del modelo	19
4.3.2.	Condiciones de contorno	21
4.3.3.	Aplicación del modelo	23
4.3.4.	Limitaciones del modelo	25
4.4.	Aplicación web de acceso libre	26
5.	Resultados	28
5.1.	Proyecciones de las distribuciones de hábitats en las marismas de Urdaibai bajo distintos escenarios de cambio climático	28
5.2.	Distribución de especies de marisma en escenarios de cambio climático	30
5.3.	Tasas de deposición según especies de marisma y escenarios de aumento del nivel del mar	31
5.4.	Creación de una aplicación web pública	33
6.	Discusión	35
6.1.	Influencia del aumento del nivel del mar en la superficie de marisma y su exposición a la inundación	35
6.2.	Adaptación de las especies halófitas al SLR: efectos en sus áreas de distribución	37
6.3.	Limitaciones del modelo y propuestas de mejora	40
6.4.	Importancia de las aplicaciones públicas online como herramientas de divulgación científica	42
7.	Conclusiones	43
8.	Bibliografía	45
9.	Anexos	51
9.1.	Anexo I: Imágenes georreferenciadas de las marismas de Urdaibai	51
9.2.	Anexo II: Elevaciones más frecuentes de los distintos elementos de las marismas de Urdaibai.	57
9.3.	Anexo III: Deposición en metros de las especies halófitas presentes en las marismas de Urdaibai	58

1. Introducción

Las marismas son ecosistemas costeros que se encuentran en la parte superior de la zona intermareal en diversos contextos geomorfológicos costeros y estuarinos de zonas templadas (Figura 1) (Fagherazzi *et al.*, 2004). Este productivo ecosistema se caracteriza por la presencia de plantas halófitas, siendo fáciles de distinguir de las llanuras mareales, estas últimas carentes de vegetación aparente y situadas a menor elevación (Roman, 2001). El equivalente a las marismas en zonas costeras tropicales es el manglar que a diferencia de las marismas, se desarrolla a partir de especies arbóreas con adaptaciones al medio marino (Perillo *et al.*, 2019). Generalmente, las marismas se desarrollan en zonas costeras de latitudes medias (30° N - 60° N y 30° S - 60° S) y los manglares en latitudes bajas (30° N - 30° S), existiendo una franja entre latitudes 10° S - 45° S y 20° N - 30° N donde pueden desarrollarse ambos ecosistemas de forma adyacente (Figura 1).

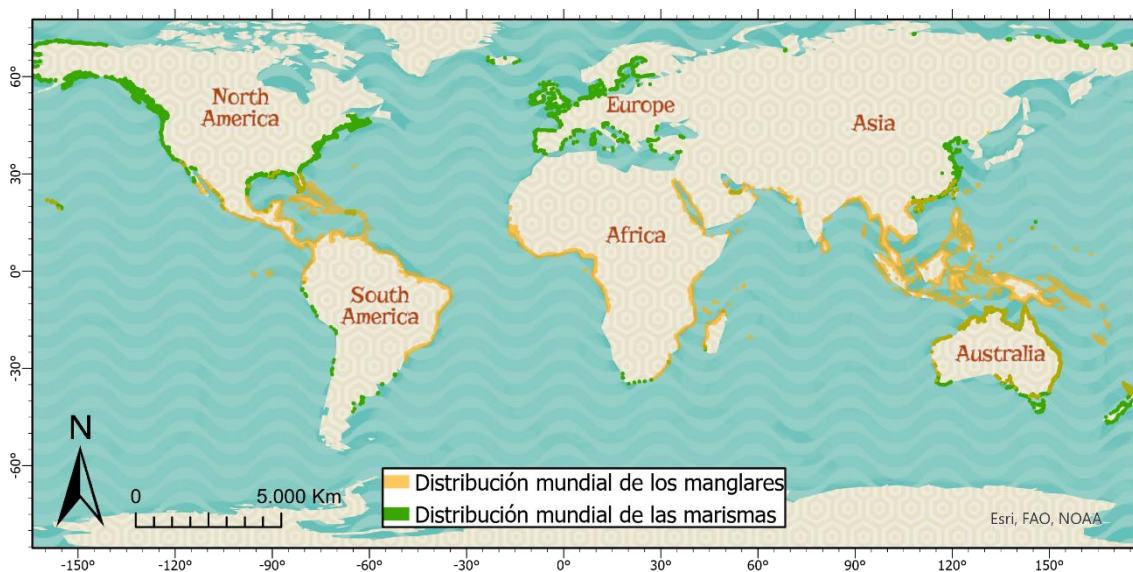


Figura 1. Zonificación mundial de las marismas y los manglares (elaboración propia a partir de Mcowen *et al.*, 2017 y Spalding *et al.*, 2010).

Las plantas de marisma son por lo general halófitas herbáceas consideradas clave para el desarrollo de este tipo de ecosistema. Se considera que son especies fundadoras o ingenieros de ecosistema por el conjunto de proceso de retroalimentación que se establecen entre la vegetación y su medio físico (Peralta *et al.* 2008). No obstante, la frontera entre el medio marino y el medio terrestre es un medio hostil y para poder colonizar esta franja del intermareal, estas especies han tenido que desarrollar importantes

adaptaciones al medio marino y sus estreses asociados. Uno de los principales factores de estrés para la vegetación de marismas es la inundación regular de agua de mar, especialmente para aquellas especies que ocupan la franja de marisma baja (Perillo *et al.*, 2019). Tanto es así, que su distribución está fuertemente vinculada a la salinidad y a los periodos de inmersión que tienen que soportar (Wang *et al.*, 2010; Adam, 1990). Como resultado, las especies halófitas se distribuyen siguiendo un marcado gradiente espacial, denominado zonación (Figura 2), que suele reflejar el nivel de tolerancia de las especies a los diferentes niveles de inmersión según la elevación topográfica del terreno (Redelstein *et al.*, 2018). Además, otros factores como el potencial redox del sedimento, la conductividad máxima del agua, el ratio de adsorción de sodio y la competición interespecífica por el hábitat también influyen notablemente en la distribución de las plantas de marisma (Sullivan *et al.*, 2018; Batriu *et al.*, 2011; Pennings y Callaway, 1992; Castillo *et al.*, 2021). En este sentido, la distribución de especies en los humedales costeros templados del noroeste europeo, bajo condiciones húmedas, se caracteriza por presentar especies del género *Spartina* en la marisma baja, especies de los géneros *Salicornia* en zonas intermedias y especies de los géneros *Halimione* y *Juncus* en áreas de marisma alta (Figura 2).

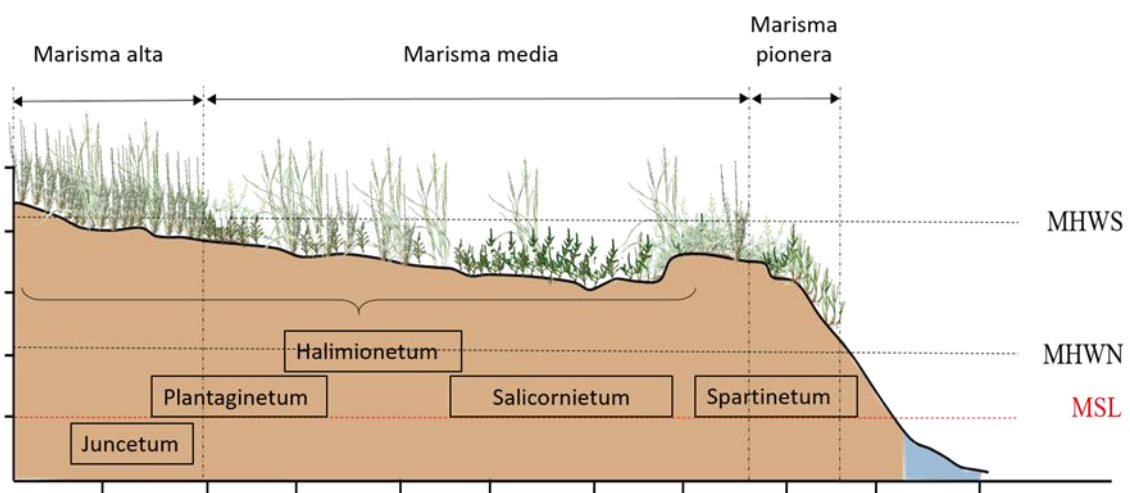


Figura 2. Secuencia típica de las especies vegetales en las marismas atlánticas del norte europeo (adaptado de Perillo *et al.*, 2019). MHWS: Nivel de pleamares vivas medias, MHWN: Nivel de pleamares muertas medias y MSL: Nivel medio del mar).

Por otro lado, las marismas son sistemas muy valiosos debido, principalmente, a los bienes y servicios que aportan al ser humano. Entre ellos destacan la protección frente a la erosión costera, el reciclado de nutrientes, el secuestro de carbono y la provisión de

alimento, entre otros (Barbier *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2012; Turner y Shaafsma, 2015; Perillo *et al.*, 2019). Es tal su importancia, que el secuestro de carbono atribuida a las marismas es 20 veces mayor que la de cualquier sistema forestal terrestre (Duarte *et al.*, 2005; Mcleod *et al.*, 2011) y, solamente en Inglaterra, se estima que ahorran 2.25 billones de libras al año en defensa costera (Turner y Shaafsma, 2015). En cuanto a la productividad biológica, Rivas y Cendrero (1991) indican que la conversión de zonas intermareales y marismañas a áreas agrícolas supone una pérdida de 250 000 \$US km⁻² yr⁻¹.

El funcionamiento y evolución de las marismas están dominados por un abanico de factores interconectados entre sí que determinan su buen funcionamiento y capacidad de adaptación, así como el patrón de zonación (Perillo *et al.*, 2019). En este sentido, variables como la elevación topográfica, la productividad del sistema y las fuentes de sedimento, por ejemplo, juegan un papel fundamental en el funcionamiento de la marisma (Kirwan y Murray, 2007; Perillo *et al.*, 2019), siendo estas mismas variables las consideradas clave para la supervivencia de este tipo de ecosistema en la actual situación de aumento del nivel del mar (a partir de ahora se utilizará el acrónimo SLR, del inglés *Sea Level Rise*) (Figura 3). Con respecto a esto último, además de los factores anteriormente mencionados, otros elementos cruciales en la resiliencia de las marismas son las relaciones de competición/facilitación que permiten o impiden la sucesión ecológica en las marismas (Castillo *et al.*, 2021) y la disponibilidad de zonas de acomodación que posibiliten la migración de las marismas hacia elevaciones superiores (Morris, 2007; Feagin *et al.*, 2010), ya que en la actualidad gran parte de estas zonas están ocupadas por construcciones costeras (Vázquez-Pinillos y Marchena-Gómez, 2021; Raw *et al.*, 2020) (Figura 4).

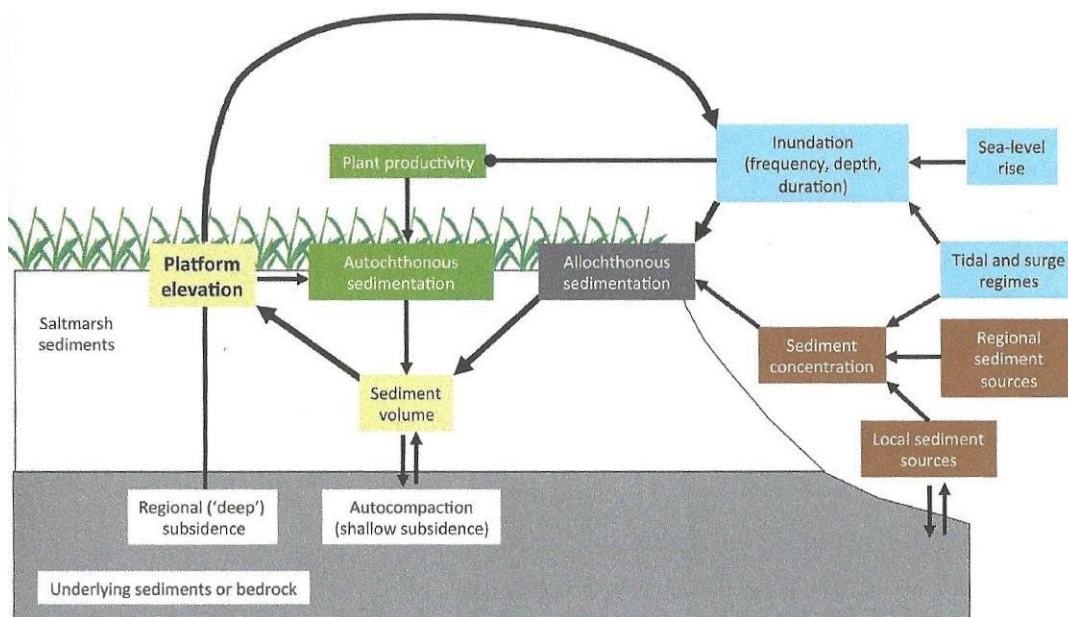


Figura 3. Representación esquemática de las principales variables que definen la resiliencia de las marismas a la subida del nivel del mar (Perillo *et al.*, 2019).

La adaptación de las marismas al SLR depende en gran medida de la capacidad de su vegetación de aumentar la tasa de deposición local. Se considera que las marismas tendrán capacidad de adaptación siempre que el balance entre la tasa de deposición y la de erosión sea superior a la tasa de SLR. De forma más específica, la capacidad de adaptación de las marismas al cambio climático está relacionada con los mecanismos de retroalimentación no lineales que se establecen entre la inundación, o régimen mareal, el crecimiento de las plantas, la acumulación de materia orgánica, la deposición de sedimentos y la erosión (Morris *et al.*, 2002; Day *et al.*, 2008; Kirwan y Megonigal, 2013; Bouma *et al.*, 2016). Trabajos anteriores determinan que las marismas podrían sobrevivir a situaciones de aumento del nivel del mar bajo cuando la fuente de sedimento es mayor de 20 mg L^{-1} (Kirwan *et al.*, 2010).

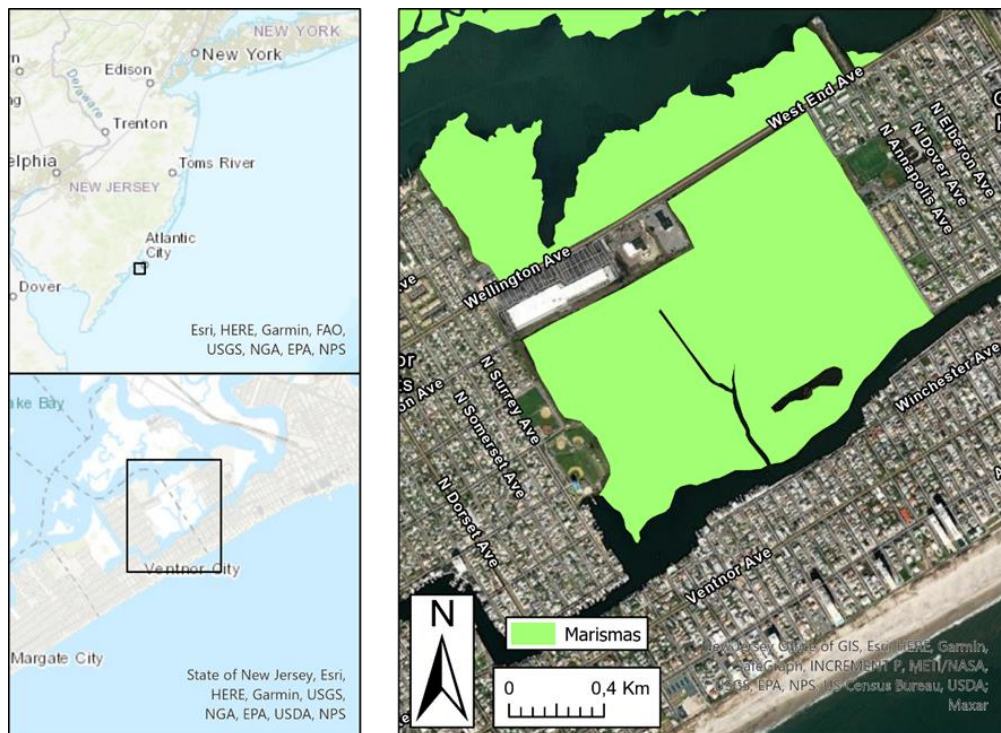


Figura 4. Sistema marismeño entre Atlantic City y Ventnor City (Nueva Jersey) con alta presencia de construcciones costeras que evitan la migración tierra dentro de las marismas (elaboración propia a partir de Mcowen *et al.*, 2017).

El IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) es el panel de expertos que define los posibles escenarios de aumentos del nivel del mar. Estos escenarios reciben el nombre de RCP (Representative Concentration Pathways) y representan el aumento del nivel del mar en función de la concentración de carbono prevista para cada uno de ellos. No obstante, la principal razón de que ocurra el aumento del nivel del mar es el forzamiento radiativo que ocasionan los efectos de gas invernadero, los cuales impiden que la energía solar se refleje al espacio, aumentando así la temperatura de la Tierra. En este contexto, el IPCC define al escenario más benigno como el escenario RCP 2.6. Este escenario plantea un futuro de bajas emisiones de gases de efecto invernadero y numerosas medidas de mitigación, implicando que para finales de siglo hay una probabilidad de 2/3 de limitar el calentamiento global de la superficie de la atmósfera a menos de 2°C (IPCC, 2019). Por el contrario, el escenario más agresivo es el RCP 8.5. Este escenario proyecta un futuro de altas emisiones de gases de efecto invernadero, sin políticas efectivas de mitigación del cambio climático, que conducirían a un crecimiento continuo y sostenido de las concentraciones atmosféricas de gases de efecto invernadero. Otros escenarios intermedios de emisiones de gases de efecto invernadero son el RCP 4.5 y RCP 6.0 (IPCC, 2019). Sin embargo, no todos los efectos esperables son negativos. También es

esperable que el aumento de CO₂ atmosférico aumente la producción primaria de las marismas (Perillo et al., 2019; Langley et al., 2009) y, por tanto, podría esperarse un aumento de la capacidad de captación de sedimento y la acumulación bajo tierra de materia orgánica en la zona vegetada.

Actualmente son muchos los autores que han estudiado que efectos podrían provocar los diferentes escenarios de cambio climático en la evolución de las marismas. Un ejemplo es el trabajo de Schile et al. (2014), en el cual se proyectan las posibles distribuciones de las marismas en la Bahía de San Francisco en diferentes escenarios de cambio climático (Figura 5). Schile et al. (2014) utilizaron un modelo que tiene en cuenta principalmente la exposición a la inundación y la productividad de las especies de marisma. Los resultados sugieren que la marisma únicamente sufrirá una mayor exposición a las inundaciones mareales bajo las mayores condiciones de aumento del nivel del mar, y esto ocurrirá incluso con las concentraciones más optimistas de fuentes de sedimento (Schile et al. 2014, Figura 5 D y F).

Lamentablemente, los estudios sobre el destino de las marismas bajo diferentes escenarios climáticos no siempre generan resultados similares, generando bastante controversia. Así, trabajos anteriores en las marismas de Hellegat (Holanda) han sugerido una inundación permanente y posterior pérdida parcial o completa de la marisma (Best *et al.*, 2018). En anteriores investigaciones en el área de estudio, en cambio, las marismas naturales del río Oka han mantenido históricamente niveles de sedimentación superiores a las del SLR (Leorri *et al.* 2013). Lo cierto es que autores como Kirwan *et al.* (2016) sugieren que las predicciones del comportamiento de las marismas al cambio climático están muy vinculadas a las metodologías aplicadas. Así, los modelos estáticos suelen pronosticar una pérdida de la superficie de marismas en todos los casos, llegando incluso a pérdidas del 100% en escenarios con un SLR bajo (0.48 metros). Mientras que, los modelos dinámicos permiten modelar la retroalimentación eco-geomórfica entre la inundación, la vegetación y el cambio de elevación, generando predicciones mucho más optimistas que los estáticos. Estos últimos modelos revelan que los escenarios más pesimistas son aquellos con una baja disponibilidad de sedimento o con un estrecho rango de marea. Así, Kirwan et al. (2016) sugieren que las marismas más susceptibles al aumento del nivel del mar son aquellas que están alejadas de los caños y canales mareales, como consecuencia de una distancia mayor a las fuentes de sedimento.

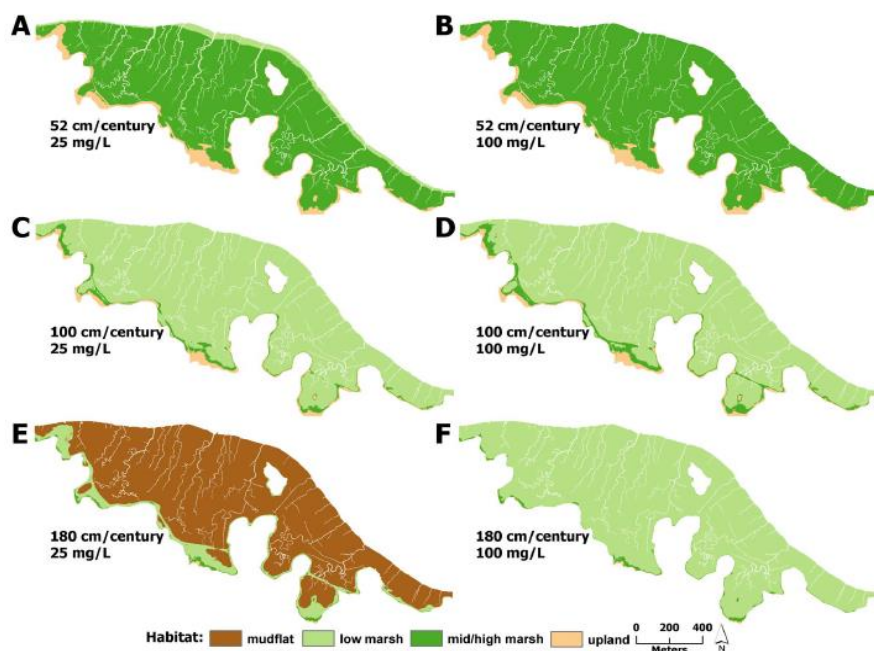


Figura 5. Predicciones de distribución de hábitats en 2100 en la marisma de China Camp según diferentes escenarios de aumento de nivel del mar y concentración de sedimento, baja y alta (Schile *et al.*, 2014).

Además, según Mariotti y Fagherazzi (2010), en un escenario optimista de SLR se verá favorecida la sedimentación, mientras que en uno elevado el proceso favorecido es la erosión. Asimismo, si la erosión conlleva una reducción del área de marisma, esto tendrá consecuencias hidrodinámicas a escala regional, provocando una disminución en la disponibilidad de sedimento, generando un ciclo de retroalimentación negativo (Donatelli *et al.*, 2020).

Dadas todas estas posibilidades en el abanico de posibles destinos de las marismas en escenarios de cambio climático, el presente estudio se ha marcado el objetivo de evaluar los posibles destinos de las marismas de Urdaibai en diferentes escenarios de cambio climático a medio y largo plazo. Para ello, se ha elaborado un modelo dinámico que tenga en cuenta las interacciones eco-geomórficas entre la inundación, la vegetación, los aportes sedimentarios y la variación de la elevación a lo largo del tiempo. Para desarrollar el modelo se han tenido en cuenta los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5. Las predicciones resultantes se espera que arrojen luz sobre los efectos que tendrá el aumento del nivel del mar en la dinámica de dichas marismas. Finalmente, como estrategia de divulgación y concienciación, se ha desarrollado también una herramienta pública y accesible que permite el análisis y consulta no solo de las áreas actuales de marisma, sino también de las propiedades privadas en la zona de Urdaibai que serán afectadas por el efecto del aumento del nivel del mar según los resultados de este estudio.

2. Ámbito de estudio

El estudio se ha realizado en las marismas de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai situadas en la desembocadura del río Oka, en la zona más oriental del Golfo de Bizkaia (Figura 6). La zona mareal es el eje principal de la reserva con 765 hectáreas de superficie, 12,5 kilómetros de largo y 1 kilómetro de ancho, lo que representa aproximadamente el 70% de su superficie original (García-Artola *et al.*, 2011).

El impacto antropogénico de la zona comenzó de forma significativa en el siglo XVIII cuando, al igual que ocurrió en muchos otros estuarios de la costa vasca, comenzó una gran ocupación de la zona de marismas, inicialmente con fines agrícolas y ganaderos, que continuó posteriormente para el crecimiento de suelo urbano e industrial (García-Artola *et al.*, 2011). A mediados del siglo XX, las zonas de marisma desecadas, inicialmente destinadas a agricultura y ganadería, se abandonaron por la emigración hacia las ciudades, permitiendo la recuperación de los flujos de marea y la regeneración natural de las marismas por la falta de mantenimiento de los diques (García-Artola *et al.*, 2011). Actualmente aún existen campos que antiguamente fueron marismas, aunque estos son ya una minoría.

Como consecuencia de la acción del ser humano en el estuario, las marismas de Urdaibai presentan un sistema muy complejo con diferentes tipos de marismas con diferentes niveles de naturalidad (Figura 7).

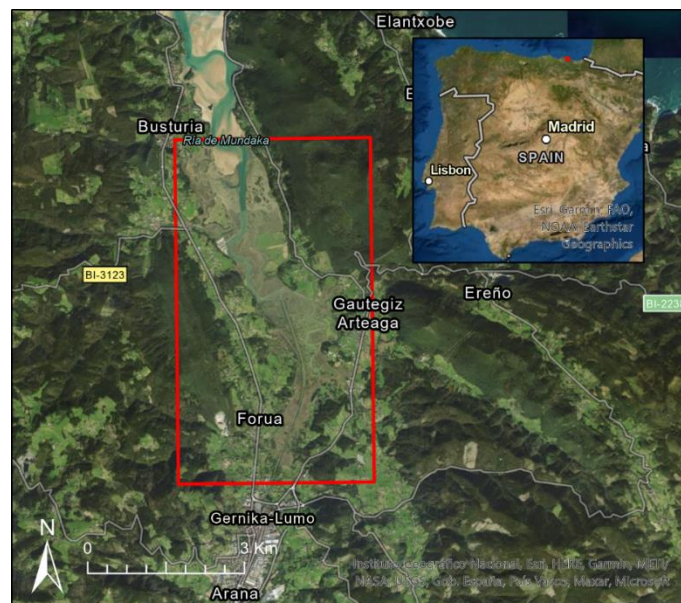


Figura 6. Localización del ámbito de estudio en la península ibérica (punto rojo) y detalle de la zona.

Las especies de marisma dominantes en el área de estudio son *Spartina marítima*, *Halimione portulacoides* y *Juncus maritimus* (Chust *et al.* 2013). Además, en la zona con menor influencia mareal del estuario también se observan grandes poblaciones de *Phragmites australis*, como se muestra en las fotos del Anexo I.

3. Objetivos

El objetivo general de este estudio es analizar la influencia del aumento del nivel del mar en las marismas de Urdaibai y dar un acceso fácil y abierto a los resultados del presente trabajo. Para abordar este objetivo general, en la presente investigación, se plantean los siguientes objetivos específicos:

3.1. *Objetivos específicos*

1. Desarrollar un modelo matemático que permita proyectar la distribución espacial de las marismas de Urdaibai según el aumento del nivel del mar, el rango de elevaciones de las especies halófitas, la concentración de sedimento presente en la plataforma de marisma y la productividad de biomasa de dichas especies. Así pues, la captación de sedimento por parte de la vegetación y la acumulación bajo tierra de materia orgánica también son tenidas en cuenta en el modelo.
2. Proyectar hasta los años 2050 y 2100 el modelo desarrollado en el objetivo anterior bajo las condiciones de los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 descritos por Sainz de Murieta *et al.* (2018).
3. Analizar la influencia del aumento del nivel del mar en la superficie total de marisma del estuario del río Oka y su tiempo de inundación.
4. Examinar la afección del SLR, y su influencia en el tiempo de inundación de las especies halófitas, en las distribuciones de estas mismas en la Reserva de la Biosfera de Urdaibai.
5. Determinar la vulnerabilidad al aumento del nivel del mar de las poblaciones de especies halófitas presentes en el estuario del río Oka.
6. Dotar a la ciudadanía y a las administraciones públicas de una herramienta específica para la visualización del efecto del aumento del nivel del mar en las marismas y las propiedades privadas de carácter agrícola o ganadero situadas en el estuario del río Oka.

4. Material y métodos

4.1. Cartografía

La caracterización de la zona de estudio (Figura 7) se ha fundamentado en investigaciones previas sobre el área de estudio (Sainz de Murieta, 2016), ortofotos y salidas de campo. Las ortofotos de acceso público utilizadas son las de los años 1945-1946, 1956-1957, 1984-1985 y 2019 disponibles en GeoEuskadi (Infraestructura de Datos Espaciales de Euskadi).

A partir de las investigaciones previas realizadas en la zona de estudio y las ortofotos arriba mencionadas, se ha cartografiado la extensión de los diferentes tipos de hábitats considerados en este trabajo mediante el software de escritorio ArcGIS Pro, gracias al cual se ha delimitado cada elemento para su posterior representación en la cartografía.

Para validar la caracterización cartográfica, se han llevado a cabo dos salidas de campo, una por cada lado del estuario. En estas salidas de campo, se realizaron numerosas fotografías del área de estudio para comprobar la validez de la caracterización de la zona. La geolocalización de las fotografías se realizó con la aplicación móvil Collector for ArcGIS (Anexo I).

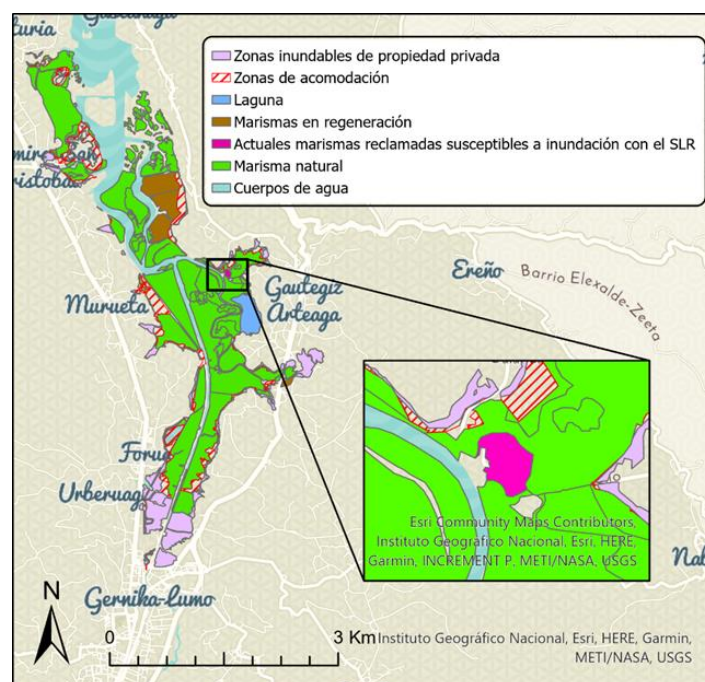


Figura 7. Caracterización del área de estudio con detalle de las actuales marismas reclamadas susceptibles a inundación con el aumento del nivel del mar.

La tipología de hábitats considerada en este estudio se detalla a continuación.

- Marismas naturales: son aquellas marismas que presentan un sistema de caños y canales bien desarrollado y una elevación similar a las marismas colindantes (Figura 8, izd).
- Marismas reclamadas: antiguas marismas naturales que han sido modificadas por el hombre para darles otro uso (generalmente agricultura y ganadería) (Figura 8, centro).
- Marismas en regeneración: antiguas marismas reclamadas que actualmente se encuentran bajo la influencia de flujo mareal, observándose que comienzan a recuperar caños y canales de drenaje. Estas marismas suelen tener una elevación diferente a las marismas naturales colindantes por la falta de aporte sedimentario que tuvieron en ausencia del flujo mareal, bien por la presencia de diques de contención o de materiales de relleno (Figura 8, dcha).
- Zonas de acomodación: son aquellas áreas dentro del Dominio Público Marítimo-Terrestre que tienen una elevación superior a la presentada por las especies halófitas que se describen en apartados posteriores y que se inundarán por efecto del cambio climático.
- Zonas inundables de propiedad privada: al igual que las zonas de acomodación, son áreas con una elevación superior a la elevación de las marismas naturales y que se inundarán con el aumento del nivel del mar, pero en este caso, no son de dominio público.
- Cuerpos de agua: zonas del estuario donde no existen plantas halófitas por la presencia permanente o casi permanente de agua, ya sea agua salina, salobre o dulce.



Figura 8. Visión general de los hábitats de marisma considerados en este estudio: marisma natural (izquierda), marisma reclamada (centro), marisma en regeneración (derecha).

4.2. Especies halófitas

En este estudio solo se han considerado tres especies de vegetación halófitas, *Spartina maritima*, *Halimione portulacoides* y *Juncus maritimus*, por disponer de información acerca de sus rangos de elevación y ser las tres especies más abundantes en el estuario del río Oka.

Spartina marítima: se trata de la única especie nativa del género *Spartina* presente en muchos de los estuarios europeos, donde suele habitar zonas de marisma baja. Además, se trata de una especie que está incluida en algunas listas rojas europeas (Curado *et al.*, 2014).

Halimione portulacoides: es una especie halófitas que se encuentra con frecuencia en costas arenosas, fangosas y marismas de las costas de Europa, el norte de África y el suroeste de Asia. Se trata de una especie que a menudo es la fisiológicamente dominante en las marismas altas y marismas bien drenadas. Además, suele bordear los canales y charcas que se inundan con la marea alta (Andrades-Moreno *et al.*, 2013) (Figura 9, izd).

Juncus maritimus: se trata de una especie perenne ampliamente distribuida en Europa, África occidental y el norte de Asia (Menéndez, 2008) que suele habitar zonas de marisma alta de los estuarios donde la inundación mareal no es muy frecuente (Boscaiu *et al.*, 2011) (Figura 9, dcha). En cuanto a su morfología, se trata de una especie relativamente pequeña, de hasta 1 metro de altura, con un rizoma grueso y largo (Boscaiu *et al.*, 2011).



Figura 9. Ilustración de las especies *Halimione portulacoides* (izquierda) y *Juncus maritimus* (derecha) en el estuario del río Oka.

4.3.El modelo predictivo

El modelo predictivo utilizado en el presente estudio es una adaptación del propuesto por Kirwan y Murray (2007), que predice las variaciones en las elevaciones de las marismas a partir de la relación entre los parámetros empíricos del modelo y las variables ambientales. El modelo se basa en la relación entre la deposición y la erosión para definir como evolucionaran las elevaciones de marisma, siendo la productividad de biomasa de las especies, la concentración de sedimento, las elevaciones de las celdas y la velocidad de la corriente las principales variables que definen dicho comportamiento.

Dicho esto, el objetivo del modelo aplicado es proyectar las posibles distribuciones de las marismas de Urdaibai en los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 para los años 2050 y 2100. De manera simplificada, la capacidad de adaptación de las marismas naturales a la subida del nivel del mar está gobernada por la diferencia entre la sedimentación en la plataforma de marisma, la erosión y el aumento del nivel del mar (ec. 1, adaptado de Perillo *et al.*, 2019).

$$\frac{\partial z}{\partial t} = DR - ErR - RSLR \quad \text{ecuación 1}$$

Donde, la variación de la elevación con el tiempo es la diferencia entre la tasa de deposición (DR), la tasa de erosión (ER) y el aumento del nivel del mar relativo (RSLR). Este último es la suma entre la tasa de aumento del nivel del mar local y la subsidencia, aunque esta última se toma como nula por no encontrar datos acerca de ello.

Las tasas de deposición (DR, ec. 2) y erosión (ER, ec. 3) para las áreas de marisma natural se han obtenido, como se ha indicado anteriormente, a partir de los algoritmos propuestos por Kirwan y Murray (2007). Estos autores consideran que la evolución de una marisma está dominada por la interacción entre la deposición y la erosión. La deposición se considera consecuencia de la captura de sedimento por las plantas, la concentración de sedimento presente en la plataforma de marisma, la acumulación de materia orgánica bajo tierra, la productividad de las especies presentes y la exposición a la inundación (ec. 2). Mientras que para estimar la erosión, se tiene en cuenta la velocidad de la corriente (ec. 3).

$$DR = (k_1 * C_{ss} + k_2 * B) * |D| \quad \text{ecuación 2}$$

Donde k_1 ($0.00009 \text{ m}^3 \text{ g}^{-1} \text{ yr}^{-1}$) y k_2 ($0.000015 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$) son constantes de proporcionalidad. k_2 representa el efecto de la captación de sedimento por la vegetación y la acumulación

bajo tierra de materia orgánica. El parámetro D es el valor absoluto de la profundidad de la celda respecto al nivel de marea alta. El parámetro C_{ss} es la concentración de sedimento en suspensión encima de la plataforma de la marisma y B es la productividad de biomasa en cada celda.

$$ErR = m * (\tau_b - \tau_c) / \tau_c \quad \text{ecuación 3}$$

Donde m es una constante ($0.0014 \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y τ_c representa la tensión de cizalladura a partir de la cual empieza a haber erosión (0.4 N/m^2). Además, τ_b es la tensión de cizalladura en cada celda y se obtiene a partir de:

$$\tau_b = (\rho * f * v^2) / 8 \quad \text{ecuación 4}$$

Donde ρ es la densidad del agua, f una constante adimensional con valor de (0.02) y v la velocidad del agua.

En el caso específico de este estudio, la erosión se ha considerado despreciable, ya que solo se alcanzan velocidades superiores a 0.4 m s^{-1} en la zona del canal (Figura 10) y dicha zona no se ha incluido en el estudio por que la complejidad de su estudio sobrepasaba los objetivos del TFM.

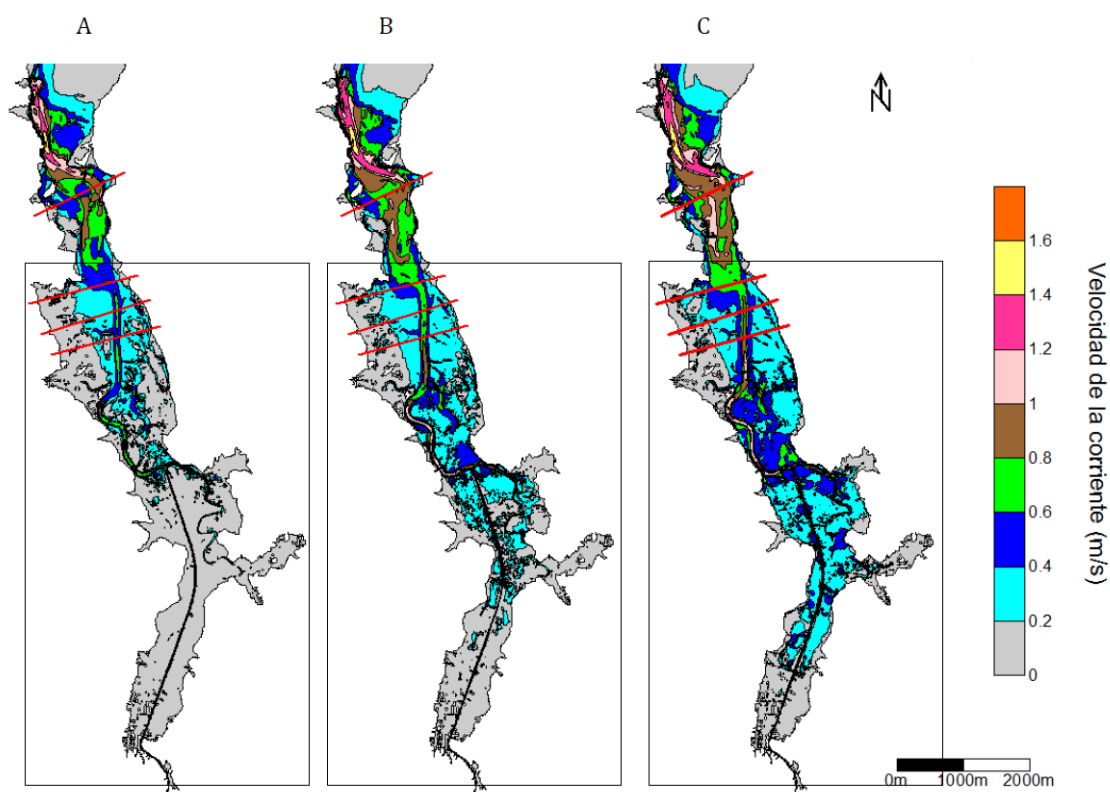


Figura 10. Velocidades máximas de la corriente obtenidas en el estuario del Oka, suponiendo A) un NMM de 2,4 m (Escenario actual), B) un NMM de 2,9 m (Escenario Futuro) y C) un NMM de 3,4 m (Escenario futuro). Se representan los transectos definidos para estudiar en detalle los cambios hidromorfológicos predichos (Chust *et al.*, 2013).

En definitiva, el modelo predictivo para el hábitat de marismas naturales que define la variación de la elevación local a lo largo de un año está definido por la ecuación 5.

$$\partial z = ((k_1 * C_{ss} + k_2 * B) * D) - RSLR \quad \text{ecuación 5}$$

Este modelo juega de forma dinámica con el balance entre la tasa de deposición y el aumento del nivel del mar. Además, la tasa de deposición se recalcula de forma dinámica en función de las condiciones de contorno (modelo digital del terreno) y el tipo de vegetación, que puede variar en función de la combinación entre topografía y nivel del mar.

El modelo se ha desarrollado en código de *Python* y evalúa los factores clave que influyen en la evolución de las marismas (captura de sedimento por las plantas, concentración de sedimento presente en la plataforma de marisma, acumulación de materia orgánica bajo tierra, productividad de las especies presentes y exposición a la inundación). Este código opera con los valores de dichas variables según el escenario descrito, y recalcula la distribución de los diferentes hábitats a partir del ráster de elevación de la zona de estudio

(Figura 11). En el apartado ‘4.3.3. Aplicación del modelo’ se explica con detalle como se tratan los tipos de hábitats que no son marismas naturales.

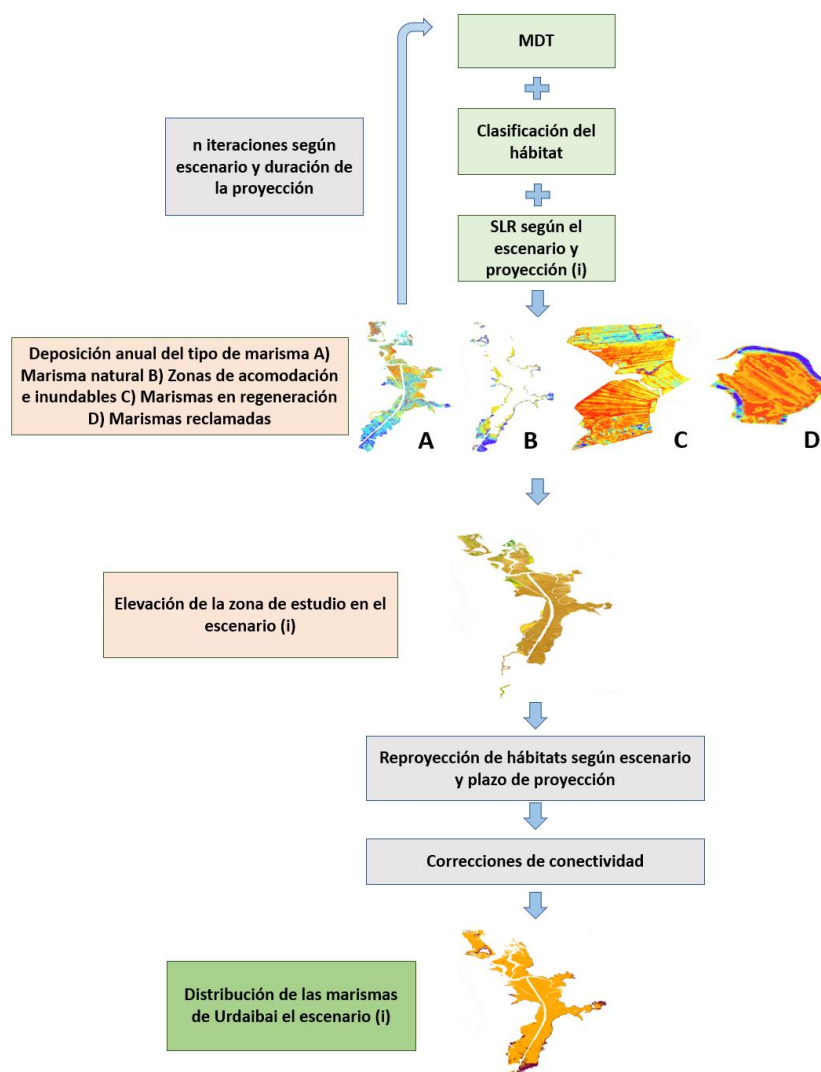


Figura 11. Flujo del modelo predictivo aplicado con código *Python* para la aplicación de la metodología descrita.

4.3.1. Variables del modelo

Las variables del modelo incluyen la concentración de sedimento suspendido (C_{ss}), la productividad de la vegetación (B), la tasa de aumento de nivel del mar ($RSLR$) y la profundidad de la celda con respecto a nivel de marea alta (D)

Aunque es una variable, la concentración de sedimento suspendido utilizado en este trabajo ha sido un valor constante de 16 g m^{-3} (De La Hera, 2016) ya que este ha sido el valor de concentración de sedimento más cercano (Suances, Cantabria) a la zona de estudio encontrado en la bibliografía. En cuanto a la producción de biomasa, se ha

estimado en función de los valores de producción de las especies consideradas. Para el caso de *Spartina maritima* y *Halimione portulacoides*, se han utilizado los valores obtenidos en Urdaibai por Benito y Onaindia (1991). Para *Juncus maritimus* al no haberse encontrado valores útiles en la bibliografía para esta especie, se ha tomado el valor medio de la productividad de *Juncus gerardii* y *Juncus roemerianus* descritas por Linthurst y Reimold (1978) y Gallagher *et al.* (1980), respectivamente. La productividad de las diferentes especies se ha considerado constante para todo el rango de distribución de cada una de ellas.

A su vez, las tasas de aumento del nivel del mar locales previstas para el puerto de Bermeo (en la desembocadura del río Oka) son de 0.257 m y 0.817 m para los años 2050 y 2100, respectivamente, según el escenario de cambio climático RCP 4.5. Las tasas de los años 2050 y 2100 según el escenario RCP 8.5, en cambio, tienen unos valores de 0.283 m y 1.023 m, respectivamente (Sainz de Murieta *et al.*, 2018). Estos valores han sido adaptados mediante una regresión lineal para el año de partida en 2017, año de realización del MDT. Así pues, las tasas de aumento del nivel del mar para los intervalos de tiempo 2017-2050 y 2050-2100 tienen valores de 0.0078 m yr⁻¹ y 0.0112 m yr⁻¹, respectivamente, en el escenario RCP 4.5 y 0.0086 m yr⁻¹ y 0.0148 m yr⁻¹ en el escenario RCP 8.5. Esta información es la referente a la obtenida por Sainz de Murieta *et al.* (2018) mediante el Modelo Geométrico Browniano.

Asimismo, la variable profundidad de la celda respecto al nivel de marea alta (D) se obtiene mediante la diferencia entre el percentil 99 de la distribución de *Juncus maritimus* descrita por Chust *et al.* (2013) y la media de cada rango de elevaciones. Se ha tomado el percentil 99 de la distribución de *J. maritimus* como nivel de marea alta, ya que el límite superior de las especies de marisma alta se sitúa aproximadamente a dicho nivel (Perillo *et al.*, 2019).

Por último, las marismas en regeneración de la zona de estudio, y por ende, las marismas reclamadas cuando comiencen a inundarse, presentan unas tasas de deposición mucho mayores a las previstas (Cearreta *et al.*, 2013). Las tasas de este tipo de marismas observadas por los autores tienen un valor medio de 16 milímetros por año. Por tanto, las variables del modelo predictivo aplicado se pueden resumir de la siguiente manera (Tabla 1).

Tabla 1. Valor de las variables aplicadas en el modelo predictivo dependiendo del tipo de marisma.

Var.	Marisma natural	Marisma en regeneración	Marisma reclamada	Zonas de acomodación e inundables
DR	$DR = (k_1 * C_{ss} + k_2 * B) * D$	16 mm yr ⁻¹	16 mm yr ⁻¹	$DR = (k_1 * C_{ss} + k_2 * B) * D$
C_{ss}	16 g m ⁻³			
B	<i>S. marítima</i> : 296 g m ⁻² yr ⁻¹ <i>H. portulacoides</i> : 952 g m ⁻² yr ⁻¹ <i>J. maritimus</i> : 1408 g m ⁻² yr ⁻¹			
RSLR	2017-2050: RCP 4.5 (7,8 mm yr ⁻¹) y RCP 8.5 (8,6 mm yr ⁻¹) 2050-2100: RCP 4.5 (11,2 mm yr ⁻¹) y RCP 8.5 (14,8 mm yr ⁻¹)			
D	Límite superior marisma – Profundidad rango de elevación			

4.3.2. Condiciones de contorno

En un modelo espacial, la calidad de las condiciones de contorno limita la calidad del producto resultante. En este caso, como condiciones de contorno se ha utilizado un Modelo Digital del Terreno (MDT) con celdas de 1 x 1 metros del año 2017 obtenido de GeoEuskadi con base de referencia al Nivel Medio del Mar de Alicante (NMMA). Este MDT tiene un detalle de la elevación muy alto, de milímetros generalmente y hasta micrómetros en algunos casos. Por ello, el tratamiento del modelo se hace para rangos de elevaciones cada 10 centímetros, ya que el ordenador presentaría grandes dificultades para operar con cada valor de elevación.

Por otra parte, también se ha utilizado como condiciones de contorno los límites de distribución de elevación de las especies halófitas consideradas. Los valores utilizados son los descritos en Chust *et al.* (2013) (Tabla 2). No obstante, dada la falta de información geoespacial adecuada para aplicar el modelo en condiciones de coexistencia vegetal, se ha asumido que las distribuciones espaciales de las especies estudiadas no se solapan entre sí y que siempre existe un 100% de cobertura vegetal. Es decir, que las especies no tienen un rango de elevaciones compartido.

El rango de elevaciones donde se solapa la distribución de varias especies se ha adaptado a unos límites sin coexistencia otorgando la parte proporcional a cada una de ellas. Así, por ejemplo, si el rango completo de elevaciones de *J. maritimus* es de 0,6 m y el de *H. portulacoides* 0,4 m, el 60% del rango compartido se le asigna a *J. maritimus* y el resto a *H. portulacoides*. Además, la elevación de distribución de las especies se ha ajustado a la resolución de 10 centímetros empleada en el modelo. Los límites inferior y superior de

las especies se han considerado como los percentiles 1 y 99 de sus distribuciones con el fin de excluir del estudio posibles valores anómalos.

A pesar de estar descrita su presencia en la zona de estudio, en este trabajo no se ha incluido la especie *Phragmites australis* debido a la falta de información sobre el rango de elevaciones de su distribución en la zona de trabajo. El ajuste de los rangos de distribución vertical utilizado en este estudio se resume en la Tabla 2.

Tabla 2. Rangos de distribución de las principales halófitas presentes en las marismas de Urdaibai. La primera columna indica los valores de distribución descritos en Chust et al. (2013), la segunda muestra el rango de distribución utilizado en este trabajo. Valores expresados en m con respecto al nivel medio del mar de Alicante.

Especie	Chust et al. (2013)	Este trabajo
<i>Spartina maritima</i>	0,87-1,6	0,87-1,27
<i>Halimione portulacoides</i>	1,02-2,11	1,27-1,67
<i>Juncus maritimus</i>	1,31-2,47	1,67-2,47

Finalmente, los límites de marisma baja y marisma alta han sido obtenidos a partir de las distribuciones de especies halófitas según Chust et al. (2013), y los valores de Marea Alta Viva Media y Máxima Pleamar Astronómica (Puertos del Estado, 2019) (Tabla 3). En este sentido, el límite inferior de marisma baja se ha determinado como el percentil 1 de distribución de especies de marisma baja, que es *Spartina marítima* en la zona de estudio. Mientras que, el límite superior de la marisma baja toma el valor de la Marea Alta Viva Media (2,267 m respecto al NMMA). Por último, el límite inferior de la marisma alta corresponde al nivel de Marea Alta Viva Media, y el superior, a la Máxima Pleamar Astronómica (2,707 m respecto al NMMA). Como resultado, los límites de la marisma baja y alta en los distintos escenarios de cambio climático quedan como queda reflejado en la Tabla 3.

Tabla 3. Límites de elevación de la marisma baja y marisma alta de Urdaibai dependiendo del escenario de cambio climático proyectado. Los valores están expresados en m con respecto al NMMA (adaptado de Chust et al., 2013 y Puertos del Estado, 2019).

Escenario	Año	Marisma Baja	Marisma Alta
Actual	2017	0,870 - 2,267	2,267 - 2,707
RCP 4.5	2050	1,127 - 2,524	2,524 - 2,964
	2010	1,153 - 2,550	2,550 - 2,990
RCP 8.5	2050	1,687 - 3,084	3,084 - 3,524
	2010	1,893 - 3,290	3,290 - 3,730

4.3.3. Aplicación del modelo

El modelo se ha desarrollado considerando las marismas naturales como el hábitat central de trabajo hacia el que todos los hábitats convergen cuando se encuentran bajo una situación de influencia mareal. Es decir, el modelo se comporta de forma distinta en los demás hábitats definidos en la Figura 6, dado que las variables del modelo tienen valores diferentes en cada uno de ellos (Tabla 1).

El comportamiento del modelo en las marismas naturales se ha definido en el inicio de la sección 4.3. En esta sección definiremos el tratamiento que han recibido el resto de hábitats hasta alcanzar una calificación de marisma natural (Figura 12).

Para las marismas en regeneración:

1. Se ha calculado la elevación más frecuente de las marismas naturales colindantes para conocer a que elevación alcanzarán el equilibrio. En el caso de las marismas de Urdaibai lo alcanzarán con una elevación de 2,2 m aproximadamente, que es la media de la elevación más frecuente de las tres zonas de marisma natural situadas al lado de las marismas en regeneración (Anexo II).
2. Para marismas en regeneración se aplica una deposición de 16 mm año^{-1} hasta que la celda alcanza un valor de 2,2 m, tras lo cual se tratan como marismas naturales.

En cuanto a las marismas reclamadas que se volverán a inundar con el aumento del nivel del mar, se ha operado de la siguiente manera:

1. Se obtiene la elevación más frecuente de las marismas naturales colindantes para saber la elevación a la que alcanzan el equilibrio, en este caso, con una elevación de 2 metros (Anexo II).
2. Se calcula la elevación más frecuente del muro o barrera que impide que se inunde el área (Anexo II). De esta forma, se calcula el año que empezará a inundarse la marisma reclamada en cada escenario de aumento del nivel del mar.
3. Una vez comienza a inundarse, se aplica la tasa de deposición de marismas en regeneración hasta que la celda alcanza la elevación de marisma natural, tras lo cual se trata como dicho hábitat.

Respecto a las zonas de acomodación y zonas inundables de propiedad privada, el tratamiento es:

1. Se calcula cuando se inundará cada rango de elevaciones para cada escenario. En este caso, se considera que el rango es inundado cuando todo el intervalo este cubierto, por ejemplo, el rango de elevaciones entre 2,47 y 2,57 metros se toma como inundado cuando el nivel de marea alta alcance los 2,57 metros.
2. Una vez que cada intervalo es inundado se le aplica una tasa de deposición de marisma natural.

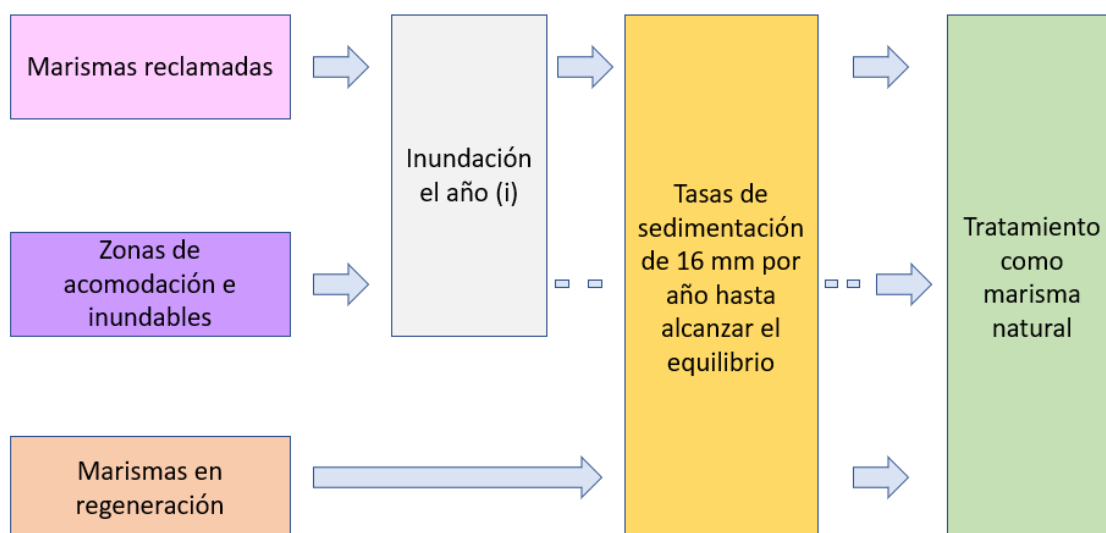


Figura 12. Esquema de la metodología aplicada en las marismas reclamadas, zonas de acomodación e inundables y marismas en regeneración.

Por último, una vez se obtiene la deposición de cada rango de elevaciones dependiendo del escenario y el tipo de marisma, se suman a la elevación actual (2017) y se recalcula la elevación de cada celda teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. El aumento del nivel del mar estimado para cada escenario de cambio climático en los años 2050 y 2100.
2. Los límites de la marisma baja y marisma alta anteriormente mencionadas. La combinación de ambos da como resultado los valores de la Tabla 3.

Finalmente, una vez obtenidas las cartografías finales, se realizan correcciones de conectividad con el software ArcGIS Pro (Figura 13). En estas correcciones, se evita recalificar como zonas de marisma baja aquellas zonas que, aún teniendo la elevación adecuada, no tienen conectividad con una fuente de aporte de agua marina (ej. canales, caños, ríos u otras marismas). Además, se ha recalificado como marisma alta aquellas zonas que presumiblemente no lo son pero que están rodeados de este último tipo de hábitat.

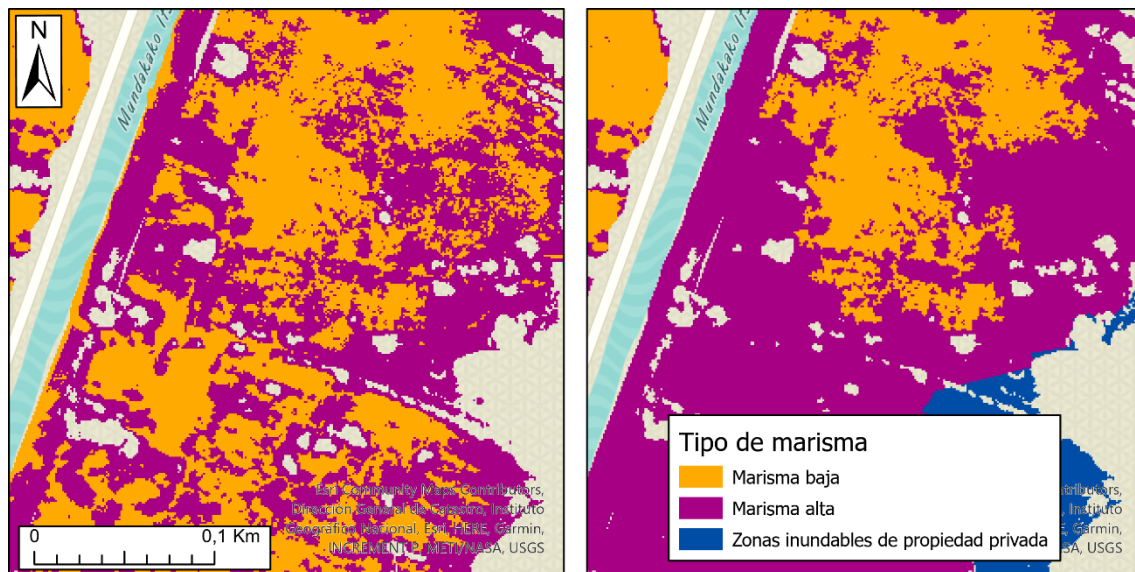


Figura 13. Ejemplo de correcciones de conectividad. A la izquierda se muestra el resultado sin realizar las correcciones de conectividad y a la derecha, el resultado con correcciones.

4.3.4.Limitaciones del modelo

Una parte importante a la hora de entender la utilidad de un modelo predictivo es entender cuales son las limitaciones del mismo. En este caso, las principales limitaciones de la metodología aplicada son las siguientes:

1. No hay erosión en la plataforma de marisma debido a que las velocidades previstas son, en general, menores que las necesarias para su existencia. Aunque en trabajos anteriores se describe que las corrientes en la zona de estudio son en general inferiores a $0,4 \text{ m s}^{-1}$, despreciar cualquier fuente de erosión debe sobreestimar la deposición en algunas áreas de la zona de estudio. Un estudio más detallado de la distribución de corrientes en la zona de estudio mejoraría considerablemente los resultados del modelo. Además, tampoco se incluye la interacción del canal con la plataforma de marisma, que debe sobreestimar el área ocupado por marismas en los distintos escenarios de cambio climático. Ya que se está desestimando la erosión que provocan las corrientes y el oleaje que penetran por el canal en las zonas de marisma más cercanas a los canales y caños.
2. El aumento del nivel del mar se considera constante dentro de los dos intervalos de tiempo considerados (actualidad-2050 y 2050-2100). La división del aumento del nivel del mar en dos intervalos de tiempo es una simplificación y que no representa fielmente la realidad.

3. La concentración de sedimento es igual en toda la plataforma. Aplicar una concentración de sedimento constante en toda la zona marismesa sobreestima la deposición en las zonas alejadas de las fuentes de sedimento como caños y canales.
4. Las marismas en regeneración y reclamadas se inundan en su totalidad (hasta los 2,47 metros). Esta asunción simplifica la exposición a la inundación de las distintas zonas en este tipo de marismas, sobreestimando la deposición de las elevaciones inferiores a 2,47 m que no se inundan en la actualidad por sus condiciones hidrodinámicas. Para minimizar el efecto de esta limitación sería necesario el desarrollo de modelos hidrodinámicos que pudieran predecir el flujo de agua durante el proceso de inundación.
5. La deposición es igual en cada rango de elevaciones. Al tomar una deposición constante en cada rango de elevaciones se subestima la deposición en las elevaciones inferiores del rango (por debajo de la media del intervalo) y se sobreestima en las elevaciones superiores del rango (por encima de la media).
6. La deposición en zonas con elevaciones superiores a 2,47 m se da de manera instantánea una vez que se inunda todo el rango de elevaciones. Esta asunción ignora la interacción agua de mar – plantas herbáceas. Es decir, no se tiene en cuenta el tiempo que tarda en morir la vegetación terrestre y cuando la zona se inunda y se asume que es instantáneamente colonizada por especies halófitas. Además, asumir que la deposición se da de manera instantánea cuando se inunda todo el rango, subestima la deposición de la zona más baja.
7. La producción de biomasa es igual para todo el intervalo de elevaciones de cada especie. La no inclusión de la variabilidad de la producción de biomasa dependiendo de la elevación, hace obviar la influencia de la exposición a la inundación en dicha variable, ignorando el estrés ecofisiológico y la competencia interespecífica al que están sometidas las especies de marismas.

4.4. Aplicación web de acceso libre

La aplicación web de acceso libre ha sido desarrollada mediante el software ArcGIS Web App Builder (Esri). Además, las funcionalidades personalizadas de los distintos elementos de la aplicación se han desarrollado mediante código *JavaScript*.

Para hacer funcional a esta aplicación, se han añadido los resultados cartográficos obtenidos en este trabajo a un repositorio online que permite su consulta pública. Para

ello, es necesario acceder al repositorio online de Esri (ArcGIS Online), donde se puede consultar y acceder a toda la información mediante la cual se ha desarrollado la aplicación (<https://services6.arcgis.com/I5TcbPkHyHc6ppBW/arcgis/rest/services/>). Dicho esto, toda esta información puede ser utilizada accediendo a los servicios WFS (Web Feature Service) mediante cualquier software GIS que permita importar este tipo de servicios web. Cabe destacar que los WFS son un tipo de servicio web que cumple con los estándares de la OGC (Open Geospatial Consortium) que busca que la información y los servicios geoespaciales sean localizables, accesibles, interoperables y reutilizables (FAIR).

5. Resultados

5.1. Proyecciones de la distribución de hábitats en las marismas de Urdaibai bajo distintos escenarios de cambio climático

Los resultados del modelo aplicado en las marismas de Urdaibai muestran las posibles distribuciones de las marismas atendiendo a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 proyectados para los años 2050 y 2100 (Figura 14). En general, los resultados muestran una tendencia muy marcada hacia un aumento generalizado de la superficie de marisma baja y, en consecuencia, una disminución importante de la marisma alta a medida que pasan los años (independientemente del escenario). A su vez, el área total de marismas se ve incrementada en todos los escenarios. Para el año 2050 las predicciones del modelo indican que la superficie de las marismas de Urdaibai se verá incrementada en unas 80 ha, aproximadamente, en ambos escenarios. Las predicciones para el año 2100, en cambio, auguran un incremento de unas 115 ha teniendo en cuenta el escenario RCP 4.5, y un aumento de unas 100 ha atendiendo al escenario RCP 8.5 (Figura 15).

Únicamente, en la zona más nororiental del área de estudio para el escenario RCP8.5 proyectado a 2100, se observa una pequeña pérdida de superficie de marisma como resultado de una situación de inundación permanente. Esta pérdida ocurre en una zona donde se parte de una menor elevación que en las demás, y donde el balance entre deposición, erosión no alcanza los niveles adecuados para adaptarse al aumento del nivel del mar. Además, la superficie de las zonas de propiedad privada susceptibles a sufrir una inundación regular, que podrían sufrir una colonización de halófitas, se ve claramente incrementada en todos los escenarios, sobre todo, en las predicciones a más largo plazo (Figura 15 D).

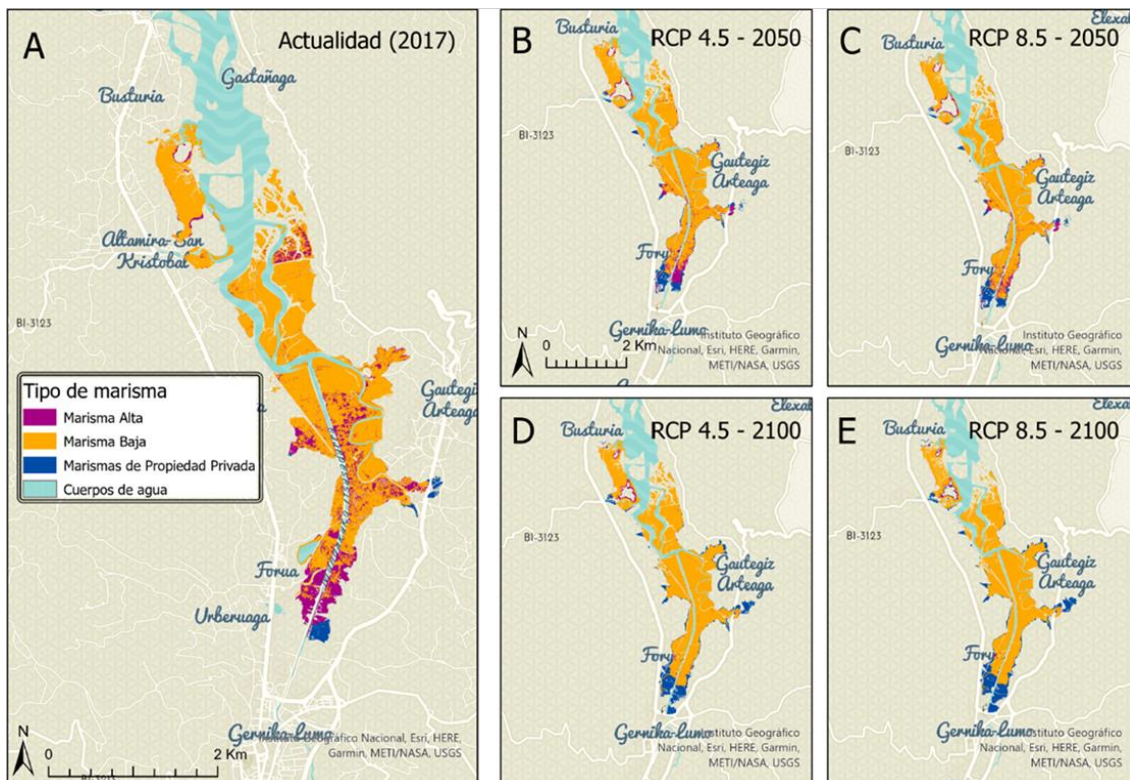


Figura 14. A) Distribución actual de los diferentes tipos marisma. B), C), D) y E) Predicción de distribuciones de los diferentes tipos de marisma para los años 2050 (B y C) y 2100 (D y E) atendiendo a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 (B y D) y RCP 8.5 (C y E).

En cuanto al área ocupado por las marismas de Urdaibai, en todos los escenarios evaluados, tanto el área total como el de marisma baja y el de zonas privadas inundadas se verán incrementadas a medida que pasen los años, mientras que la superficie de marisma alta disminuirá (Figura 15). Para esta variable en concreto, merece la pena resaltar las diferencias observadas entre la situación actual y los escenarios RCP 4.5 y 8.5. En los dos escenarios proyectados, el área total de zonas periódicamente inundadas se incrementará. No obstante, para el año 2100, el aumento es menor en el escenario RCP 8.5. Esta respuesta se debe a la pérdida de superficie de marisma en la zona nororiental del estuario, que se quedará inundada permanentemente.

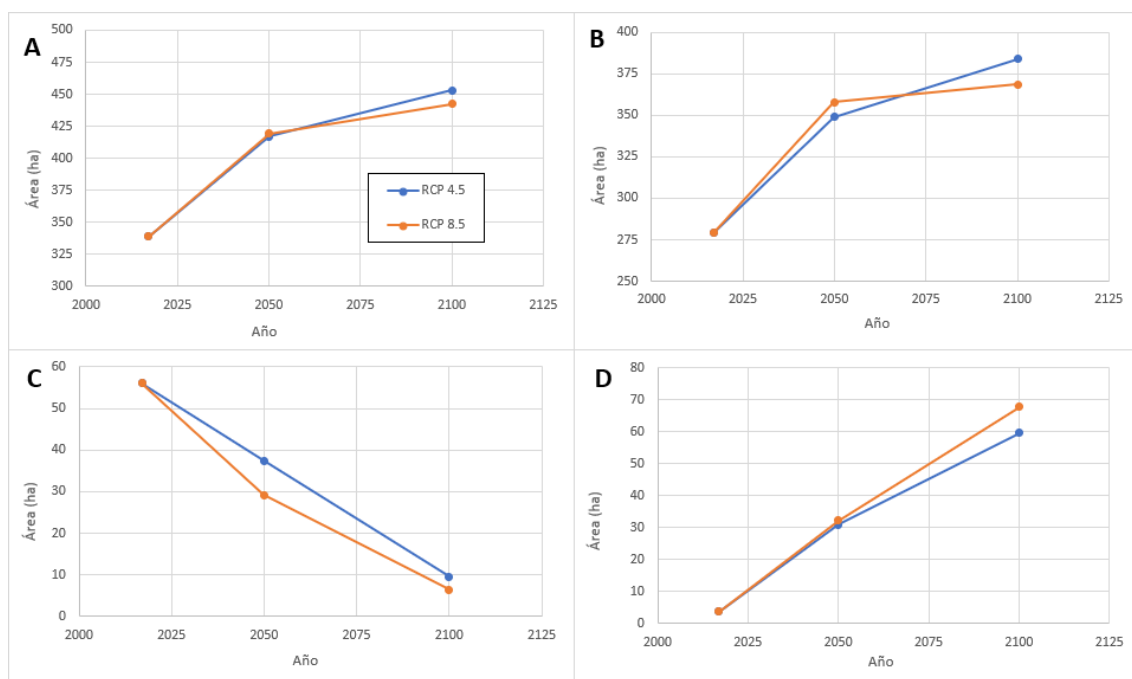


Figura 15. Áreas de las distintas zonas de marisma actuales (2017) y previstas para los años 2050 y 2100 según los escenarios RCP 4.5 (azul) y RCP 8.5 (naranja). A) Área total. B) Área de marisma baja. C) Área de marisma alta. D) Área de zonas privadas inundadas.

5.2. Distribución de especies de marismas en escenarios de cambio climático

Los resultados de este trabajo muestran que la distribución de plantas de marisma aumentará de forma general a lo largo del estuario. No obstante, el resultado no será igual para todas las especies. La especie *J. maritimus* es la que presenta un mayor aumento de distribución, con incrementos que van desde el 30% en el escenario RCP 8.5 para el año 2050, en el que la distribución excluye las áreas de propiedad privada (Figura 16, B), hasta un incremento máximo del 65,1% en el escenario RCP 4.5 para el año 2100, teniendo en cuenta las áreas de propiedad privada (Figura 16, A).

Los cambios en la distribución espacial de *S. marítima* y *H. portulacoides* varían dependiendo del escenario y proyección temporal (Figura 16). Para el año 2100, se espera un aumento en la distribución *S. marítima* en torno al 7% en el caso del escenario RCP 4.5 y una disminución del 56%, aproximadamente en el escenario RCP 8.5. Sin embargo, la distribución de *H. portulacoides* se espera que sufra una disminución de superficie para el año 2050 en ambos escenarios, siendo la disminución mucho más acentuada para el

2100 bajo el escenario RCP 4.5. Por el contrario, la proyección a 2100 del escenario RCP 8.5, sugiere una distribución espacial de *Halimione portulacoides* similar a la actual.

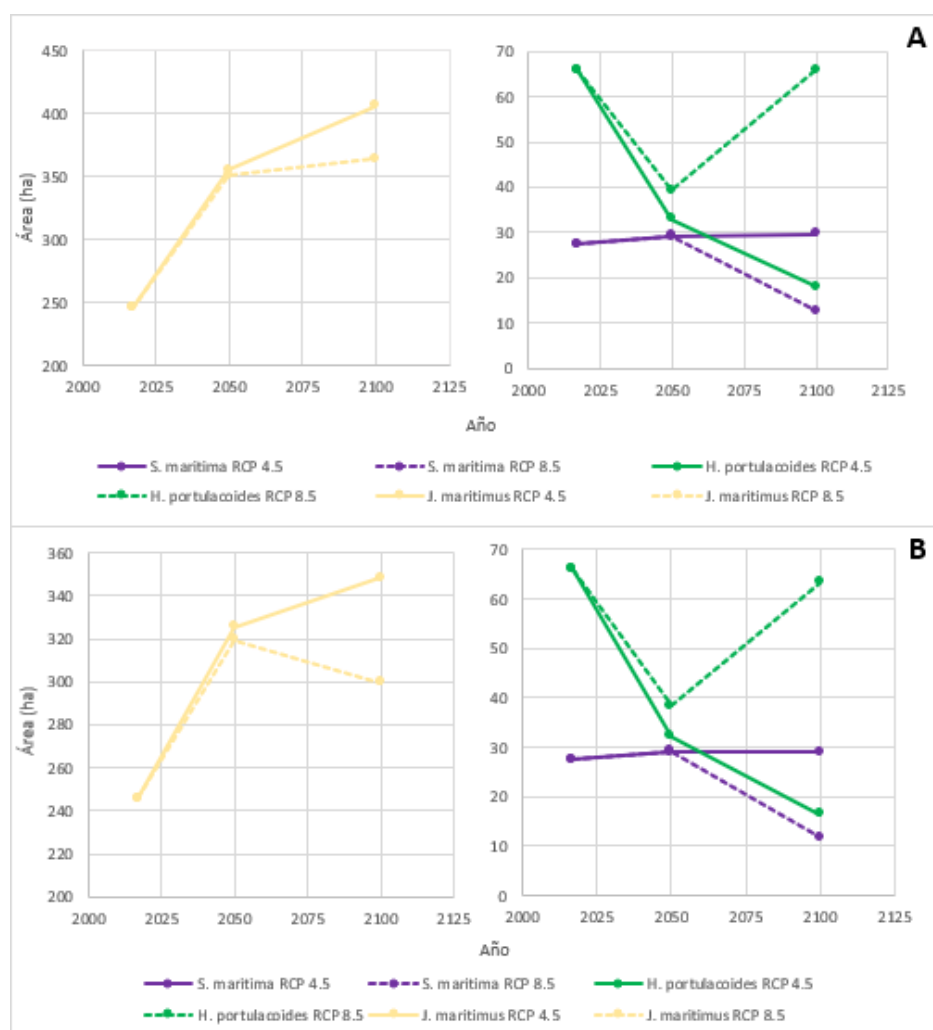


Figura 16. Área actual y prevista para las especies presentes en Urdaibai para los años 2050 y 2100 atendiendo a los escenarios de cambio climático RCP 4.5 y RCP 8.5 A) Incluyendo en el cálculo las áreas de propiedad privada que se inundarán en el futuro B) Excluyendo en el cálculo las áreas de propiedad privada que se inundarán en el futuro.

5.3. Tasas de deposición según especies de marisma y escenarios de aumento del nivel del mar

Las tasas de deposición utilizadas en el presente estudio bajo los escenarios RCP 4.5 y 8.5 varían dependiendo de la especie halófita dominante (para más información consultar el Anexo III). Como se puede observar, el hábitat donde se prevé una deposición mayor es dominado por la especie *Halimione portulacoides* (Figura 17). Mientras que en el que se espera una menor deposición es el hábitat de *Spartina*

maritima. La tasa de acumulación de sedimento resulta de la combinación de diferentes factores, incluyendo la producción primaria de la vegetación, la acumulación de materia orgánica bajo tierra, la concentración de sedimento en el estuario y la elevación de distribución de cada especie. Por último, la halófito *J. maritimus* presenta un rango amplio de tasas de deposición. Así, para el año 2100 las predicciones estiman valores de deposición entre 0,464 m y 1,150 m, lo que supone una diferencia máxima del 250% aproximadamente.

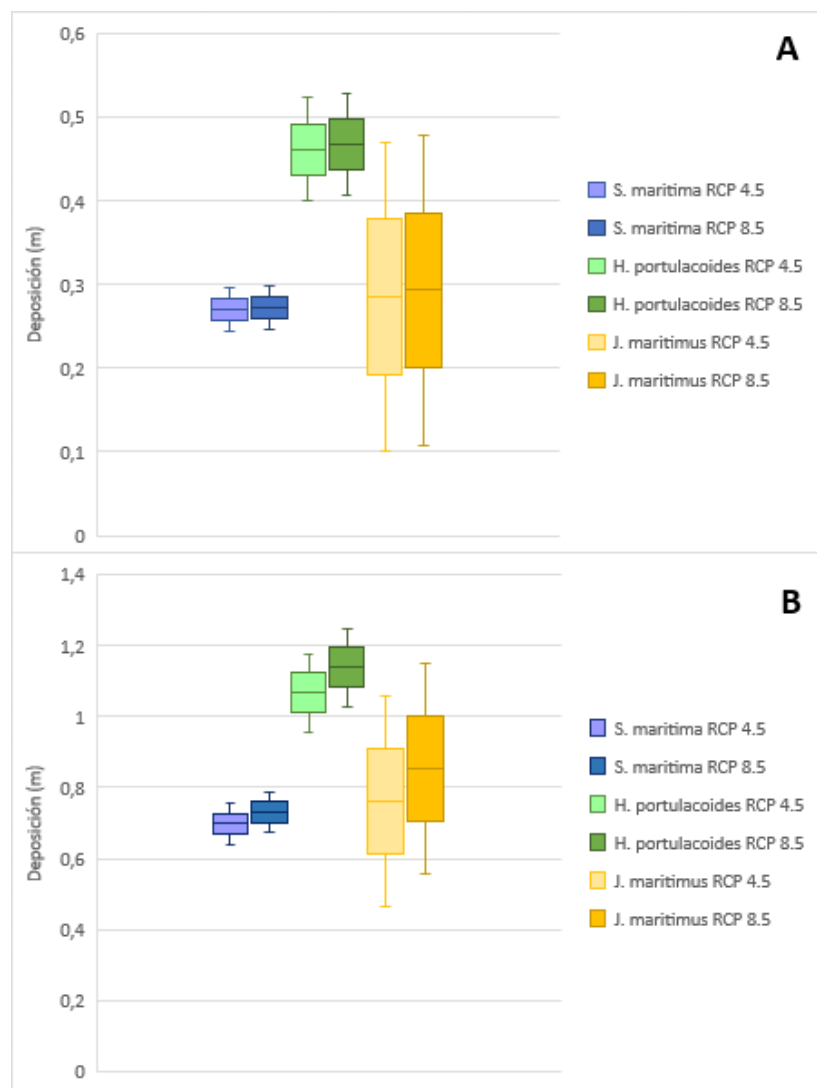


Figura 17. Acumulación de sedimento prevista en los hábitats de *Spartina marítima*, *Halimione portulacoides* y *Juncus maritimus* para los años 2050 (A) y 2100 (B), respectivamente, atendiendo a los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 y teniendo en cuenta la captura de sedimento por parte de la vegetación, la acumulación de materia orgánica bajo tierra, la concentración de sedimento presente en el estuario y la elevación a la que se encuentra cada especie.

5.4. Creación de una aplicación web pública

Para poner a disposición pública los resultados de este trabajo se ha creado una herramienta interactiva disponible en la URL: https://benategidazu.github.io/Parcelas_Afectadas_App/ (Figura 18). Este portal presenta a su derecha un panel donde se pueden activar o desactivar diferentes escenarios. Cada escenario activa, en una escala de colores, las parcelas (porciones del suelo de propiedad privada, generalmente con un uso agrícola o ganadero) potencialmente ocupadas por cada hábitat considerado. Además, en la parte superior-izquierda de la aplicación, justo debajo de la barra de búsqueda de localidades, hay disponibles 5 botones que dotan a la aplicación de otras funcionalidades de interés para el usuario. El primer botón de la izquierda, da la opción de modificar el mapa base para una mejor visualización y contextualización de los datos. El segundo permite extraer datos concretos de la zona de estudio a través de una cuenta de ArcGIS Online gratuita. El tercer botón permite medir las distancias y áreas indicadas interactivamente por el usuario. El cuarto botón contabiliza el número de parcelas afectadas por los movimientos de marea. Mientras que el quinto botón permite introducir información adicional a la herramienta, ya sea información del repositorio público de Esri anteriormente mencionado (ArcGIS Online), datos locales o servicios web de distintas fuentes. La información que permite introducir el quinto botón al usuario puede ser tanto geoespacial, vectorial (puntos, líneas y polígonos) y ráster (Modelos Digitales del Terreno, temperatura, índices de vegetación, etc.), como en formato de tabla (e.g. en formato excel o csv).

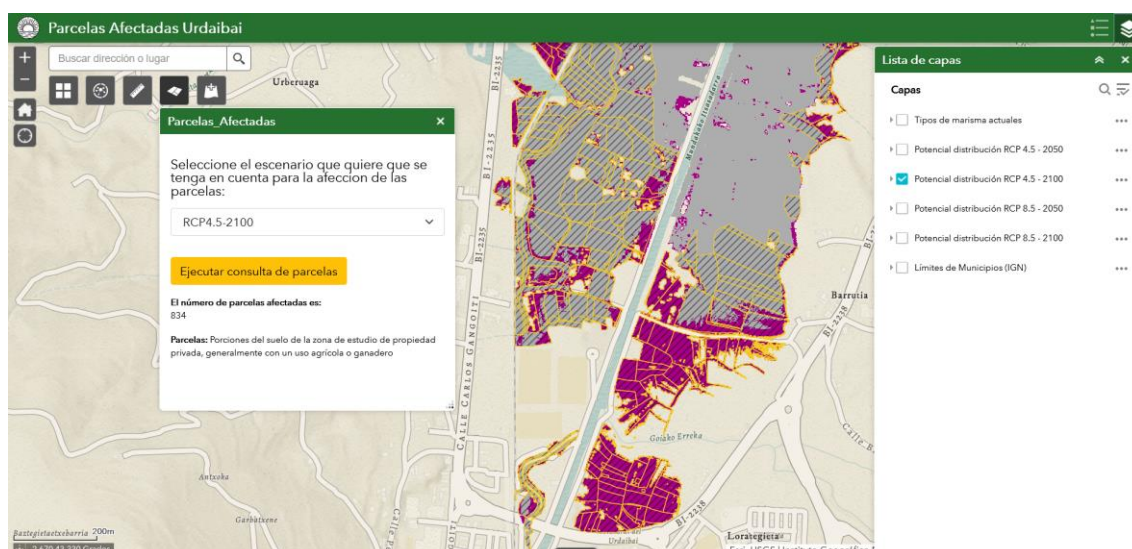


Figura 18. Visual de la interfaz de la aplicación web de acceso público Parcelas Afectadas Urdaibai creada para mostrar los resultados del estudio, el número de parcelas afectadas en cada escenario de cambio climático, extracción de la información y análisis de las áreas afectadas. Además, también permite al usuario introducir información de distintas fuentes que le sean de interés.

En definitiva, se ha construido una herramienta útil que permite informar, tanto a las administraciones públicas como a la ciudadanía, no sólo de las zonas de marisma que van a verse modificadas, sino también de las zonas privadas que se podrían ver afectadas por inundación mareal en un futuro, teniendo por tanto un gran potencial para labores de concienciación, divulgación y gestión costera. En este sentido, el número de parcelas afectadas permite a las administraciones públicas conocer cuantas se verán afectadas por los movimientos de marea y dar a conocer a los particulares, mostrando en el mapa las parcelas afectadas, si alguna de su interés se verá dañada.

En todo caso, el principio de precaución debe ser aplicado a la hora de gestionar las marismas de Urdaibai por su gran importancia e incertidumbres acerca de su evolución. Por tanto, esta aplicación no debe utilizarse bajo ningún caso en la programación y gestión de la defensa costera. Ya que, entre otras limitaciones, el modelo empleado para la elaboración de esta herramienta no tiene en cuenta eventos climáticos extremos, por lo que su utilización en estos casos solo puede ser orientativa.

6. Discusión

Los resultados del presente estudio indican que las marismas de Urdaibai aumentarán su área total independientemente del escenario de cambio climático proyectado. Además, el tiempo de inundación del sistema, en general, aumentará de forma considerable al convertirse zonas de marisma alta en zonas de marisma baja. La especie con mayor capacidad de mantener tasas de deposición similares o mayores al SLR es *Halimione portulacoides*, y la que menos, en cambio, *Spartina maritima*. En consecuencia, las elevadas tasas de deposición de *H. portulacoides* permiten la creación de condiciones ambientales adecuadas para especies de elevaciones superiores como *Juncus maritimus* (Ivajnić *et al.*, 2016). Por último, la inversión de una mayor cantidad de recursos en estudios de facilitación en marismas, modelos hidrodinámicos que predicen el flujo de agua y una mayor cantidad de datos de calidad permitirá mejorar los resultados de los modelos predictivos de esta índole.

6.1. Influencia del aumento del nivel del mar en la superficie de marisma y su exposición a la inundación

Los resultados obtenidos en este trabajo indican que la zona de estudio evolucionará hacia un sistema más dinámico, en el que la regulación mareal de las zonas de marisma se verá incrementada. Conclusiones similares fueron publicadas por Boorman (2003) y Schile *et al.* (2014). Específicamente, el trabajo de Schile *et al.* (2014) sugiere que si la disponibilidad de sedimento es elevada, las marismas no sufrirán pérdida de superficie en escenarios de SLR (Kirwan *et al.*, 2010). Nuestro trabajo también apoya a esta hipótesis, sugiriendo que las marismas de Urdaibai no tendrán problemas de adaptación al aumento del nivel del mar siempre que exista un aporte sedimentario adecuado y suficiente disponibilidad de zonas de acomodación (Kirwan *et al.*, 2010; Feagin *et al.* 2010). Estos resultados contrastan con los resultados de otros autores como el de Best *et al.* (2018), en el que todos los escenarios de aumento del nivel del mar proyectados conducen a la inundación y pérdida de marisma (Kirwan *et al.*, 2016), poniendo de manifiesto que las predicciones sobre evolución de marismas con aumento del nivel del mar dependen de las condiciones específicas del área de estudio y del modelo o metodología aplicada (Kirwan *et al.*, 2016).

En el caso de las marismas de Urdaibai, el área total no sólo podría mantenerse sino que incluso podría verse incrementada (Schile *et al.*, 2014), y por lo tanto, también su provisión de servicios ecosistémicos. En este sentido, la naturalización de zonas agrícolas a hábitats de marisma podría acarrear un aumento de la capacidad de secuestro de carbono 20 veces mayor en cada hectárea convertida (Duarte *et al.*, 2005; Mcleod *et al.*, 2011) y un aporte de 250.000 \$USD por kilómetro cuadrado y año gracias a la productividad biológica (Rivas y Cendrero, 1991). Así pues, es importante incidir que estos beneficios pueden no verse incrementados en las zonas privadas que son potenciales zonas de inundación, puesto que los propietarios podrían impedir la inundación mediante barreras naturales o muros que impedirían la migración tierra adentro de las marismas (Bouma *et al.*, 2016; Raw *et al.*, 2020), lo que llevaría a una superficie menor de marismas del río Oka a la esperada.

Además, los resultados aquí presentados coinciden con lo expuesto por Kirwan *et al.* (2010), que sugiere que aquellas marismas que tengan un aporte sedimentario mayor a 20 mg L⁻¹ sobrevivirán a aumentos pequeños del nivel del mar. Es más, en el estudio aquí presentado, con una concentración de sedimento de 16 mg L⁻¹, el modelo predice que las marismas de Urdaibai sobrevivirán a todos los escenarios de cambio climático expuestos, ya sean escenarios conservadores o extremos, exceptuando las zonas de elevación muy baja situadas en la zona más nororiental del estuario (Figura 19).

A pesar de estos resultados optimistas, el principio de precaución debe ser el que impere siempre en la gestión de un sistema tan sensible como las marismas, ya que una disminución espontánea de superficie marismeña puede provocar un efecto cascada que conduzca a una pérdida de superficie mayor (Donatelli *et al.*, 2020), y como consecuencia, a una pérdida de los beneficios que este ecosistema aporta a la sociedad (Barbier *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2012; Turner y Shaafsma, 2015).

Además, el ejemplo de las marismas de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai podría no ser representativo de otros sistemas más antropizados. Ya que Urdaibai es un sistema muy bien conservado, sin diques de contención en su cuenca hidrográfica que impidan el aporte sedimentario hacia zonas estuarinas (El Aoula *et al.*, 2021), como por la presencia de una figura de protección que regula el crecimiento urbanístico que obstruiría la capacidad de migración tierra adentro de las marismas (Raw *et al.*, 2020; Morris, 2007).

6.2. Adaptación de las especies halófitas al SLR: efectos en sus áreas de distribución

Los resultados ponen de manifiesto que la especie *H. portulacoides* es la que muestra la mayor capacidad para readaptar su elevación al ritmo del aumento del nivel del mar. Las condiciones de *H. portulacoides* (productividad de biomasa) y el hábitat (elevaciones) en el que se desarrolla (Benito y Onaindia, 1991; Chust *et al.*, 2013)), hacen que presente unas tasas de deposición muy altas (Anexo III), que en ningún caso son menores que el aumento del nivel del mar esperado en la zona de estudio (Sainz de Murieta *et al.*, 2018). Estos resultados son sumamente importantes puesto que indican que la exposición a la inundación en el hábitat de *H. portulacoides* en Urdaibai disminuirá con el tiempo, facilitando la colonización de especies menos especializadas típicas de marisma alta como *J. maritimus* (Castillo *et al.*, 2021; Ivajnsic *et al.*, 2016), que anteriormente no podían por presentar un tiempo de inundación demasiado elevado para su correcto desarrollo (Boorman, 2003). Este proceso de facilitación en marismas también ha sido descrito por otros autores en otros lugares como las marismas del Odiel, Huelva (España), donde el efecto de la captura de sedimento por parte de *Spartina maritima* produjo un aumento de la elevación y un consiguiente aumento del potencial redox y disminución de la influencia mareal, lo que permitió la colonización de dichas zonas por especies menos tolerantes a dichos factores (Castillo *et al.*, 2021).

Mientras tanto, el hábitat con menos capacidad de respuesta es el de la especie *S. marítima*. Esto junto a una distribución en las cotas más bajas (Figura 19), ilustra la vulnerabilidad de esta especie al aumento del nivel del mar. La cual queda claramente reflejada bajo el escenario RCP 8.5 para el año 2100 con la pérdida de superficie vegetada (Figura 15) en la zona nororiental del estuario, donde se encuentran las elevaciones apropiadas para *Spartina maritima* (Chust *et al.*, 2013) (Figura 19). Este resultado coincide con lo expuesto por Mariotti y Fagherazzi (2010) donde un aumento moderado del nivel del mar favorece la deposición en marismas (e.g. RCP 4.5), mientras que un SLR elevado superaría la capacidad de adaptación de esta especie, favoreciendo a largo plazo la inundación permanente y pérdida de superficie de marisma como se observa en el escenario RCP 8.5 para 2100 donde habita *S. marítima*.

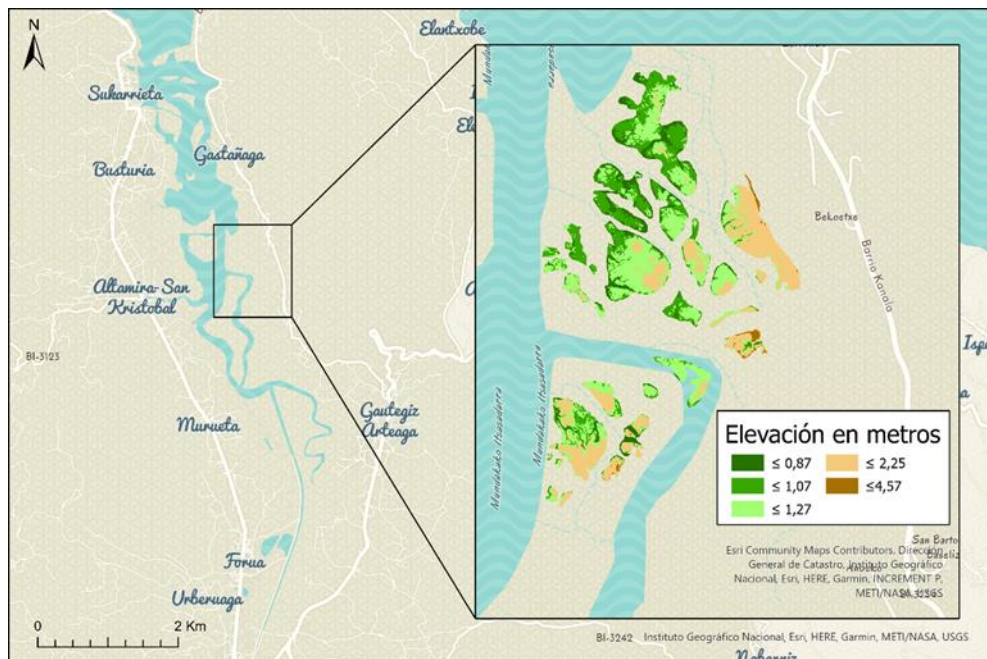


Figura 19. Ilustración de las elevaciones (m) de las marismas de la zona nororiental del estuario donde se encuentran las condiciones apropiadas para el desarrollo de *Spartina maritima*.

Por otro lado, *J. maritimus* presenta deposiciones similares al aumento del nivel del mar esperado en el área de estudio (Sainz de Murieta et al., 2018), lo que podría indicar que esta especie estará en equilibrio con el SLR en ambos escenarios de cambio climático.

Por tanto, las predicciones del modelo desarrollado en este estudio sugieren que las marismas del río Oka seguirán manteniendo el pulso al aumento del nivel del mar, como lo han hecho históricamente (Leorri et al., 2013).

Los resultados del modelo presentado ofrecen una primera aproximación al destino de las marismas de Urdaibai en futuros escenarios de cambio climático y deben interpretarse con precaución dada la limitada calidad de los datos utilizados. Indudablemente, este modelo produciría resultados más fiables si se realizaran estudios más detallados sobre la distribución y la capacidad de adaptación al cambio climático de las especies halófitas dominantes en este sistema, incluyendo los efectos de zonas de distribución solapada y los mecanismos de sucesión (e.g. facilitación). Los procesos de facilitación de marismas dependen de las condiciones específicas de cada caso de estudio como son el potencial redox del sedimento (Castillo et al., 2021), la conductividad máxima del agua (Sullivan et al., 2018) o la concentración de sedimento, elevación de las especies y productividad de las especies, que determinan la deposición en cada tipo de hábitat (Kirwan y Murray, 2007; Perillo et al., 2019), y, por tanto, su evolución con el aumento del nivel del mar.

Aun así, lo cierto es que, según el modelo predictivo aplicado en el presente estudio, *H. porturoides* es una especie fundamental para la adaptación de la marisma, que desarrolla un mecanismo de facilitación en condiciones de SLR, favoreciendo la creación de hábitat para especies de marisma alta a costa de su supervivencia.

Las bajas tasas de deposición asociadas a *S. marítima*, en comparación a las otras dos especies, vienen explicadas por una producción primaria más baja (Benito y Onaindia, 1991). Este efecto no queda compensado por el efecto positivo en la deposición de una cota más baja (ec. 5), siendo elevado el riesgo de inundación permanente quedándole únicamente la opción de migrar hacia cotas más elevadas. Sin embargo, esta estrategia también estaría limitada por las altas tasas de deposición de *H. portulacoides* que impedirían que *S. marítima* pudiera colonizar dichas áreas.

En resumen, las condiciones específicas de cada caso de estudio determinarán la evolución de las áreas de cada una de las especies (Batriu et al., 2011), siendo estas áreas afectadas además de por las condiciones de cada especie (productividad de biomasa y elevación), por las de las especies competidoras en elevaciones superiores e inferiores (Pennings y Callaway, 1992). Es decir, las propiedades específicas de las especies halófitas junto a las relaciones de competición o facilitación que tienen con las demás especies del estuario, determinarán si una especie se verá desplazada o, por el contrario, aumentará su distribución.

Por otro lado, afortunadamente para las marismas de Urdaibai, la ausencia de malecones u otras estructuras de protección junto con la presencia de zonas de acomodación (Figura 7) y de áreas de propiedad privada de uso agrícola o ganadero que se inundarían con el aumento del nivel del mar, permitirán la migración hacia tierra de las poblaciones halófitas (Raw et al., 2020; Bouma et al., 2016). Siendo esto especialmente importante para las zonas de marisma alta, en nuestro caso colonizadas por *J. maritimus* (Morris, 2007). Es necesario aclarar, que el aumento de distribución de *J. maritimus* podría estar sobreestimado al haber sido desestimada la presencia de *Phragmites australis* por limitaciones metodológicas para su cálculo. Por lo tanto, la distribución espacial ocupada por *J. maritimus* sería esperable que fuese parcialmente ocupada por *P. australis*, una especie competidora natural en algunas zonas del estuario (Figura 20) (Dirección de Medio Natural y Planificación Ambiental del Gobierno Vasco y Ihobe, 2014).



Figura 20. Zonas de coexistencia competitiva entre *Phragmites australis* y *Juncus maritimus* en el estuario del río Oka. Descripción de la zona: EU1_es) Herbazales y arbustadas de origen antrópico. EU1_eu) Antropikoko Belardi eta zuhaixka guneak. EU2_es) Juncales marismeños de *Juncus maritimus*. EU2_eu) *Juncus maritimus*-en itsas ihidiak. NOTAS) Marisma. Comunidad alóctona invasora de *Baccharis halimifolia*. *Junco marítimo*-*Caricetum extensae*. Carrizal de *Bolboschoeno compacto* *Phragmites australis* (modificado de la cartografía de los Habitat EUNIS de Urdaibai obtenidos de GeoEuskadi).

6.3.Limitaciones del modelo y propuestas de mejora

Los modelos predictivos son una herramienta predictiva en el estudio de los efectos del cambio climático en sistemas naturales. No obstante, es importante tener en cuenta que las predicciones resultantes tienen una validez limitada generalmente asociada a la calidad de la información utilizada para alimentar el modelo y las asunciones realizadas. En este apartado se resume cuales son las limitaciones principales del modelo utilizado y se dan sugerencias para su mejora.

1. Tasas de erosión. Una de las principales limitaciones del modelo es la falta de tasas de erosión. Indudablemente, la inclusión de la erosión causada en la plataforma de marisma por el oleaje y las corrientes de los caños y canales, reduciría las incertidumbres de las predicciones. No obstante, la complejidad de incluir los efectos del canal principal en el modelo hubiesen requerido de la realización de otro trabajo de fin de máster.
2. Concentración de sedimento suspendido. El modelo actualmente solo utiliza un único valor de concentración de sedimento suspendido, ya que ha sido el único

valor para la zona de estudio encontrado en la bibliografía. La incertidumbre del modelo sin duda mejoraría con una toma de datos de la concentración de sedimento en distintos puntos de la plataforma de marisma, que podrían interpolarse espacialmente para simular de una manera realista la concentración de sedimento que llega a cada punto de la marisma. De esta manera, los efectos de la captación de sedimento por las plantas se vería reflejada, llegando una cantidad menor de sedimentos en suspensión a las zonas alejadas de los canales y caños (Fagherazzi *et al.*, 2012).

3. Inundación de marismas en regeneración y reclamadas. El modelo carece de modelos hidrodinámicos para predecir el flujo de agua de mar en las marismas en regeneración y reclamadas. Sin embargo, el uso de este tipo de modelos aportaría los datos necesarios para conocer en que momento se inunda cada una de las zonas de dichos tipos de marisma.
4. Resolución espacial. La resolución espacial utilizada en este trabajo es de 10 cm por problemas de potencia informática. Un equipo informático mejor capacitado para ejecutar modelos que requieran de muchas iteraciones, permitiría conocer la deposición de cada elevación en concreto, sin asumir que la deposición es igual en un rango de elevaciones determinado.
5. Producción vegetal. Los valores de producción empleados en este trabajo son deterministas y estáticos. Indudablemente, el modelo mejoraría si se tuviese en cuenta los efectos de las condiciones ambientales en la producción (e.g. elevación, salinidad del suelo, etc.) y también los efectos de la estacionalidad (Hill y Roberts, 2017).
6. Colonización y sucesión. El modelo actualmente considera efectos instantáneos de cambios en la vegetación dominante. Sin embargo, esta asunción no es realista. Sería de gran ayuda mejorar el conocimiento sobre procesos de facilitación en marismas (Boorman, 2003; Castillo *et al.*, 2021) y también conocer los plazos necesarios para que las especies halófitas colonicen los hábitats de plantas terrestres. Esto sería especialmente importante para mejorar la predicción sobre el comportamiento de las zonas de acomodación e inundables.
7. Aumento del nivel del mar. Merece la pena destacar que las incertidumbres acerca de las tasas de aumento del nivel del mar en los distintos escenarios de cambio climático, es un factor que no puede ser simulado de manera precisa (Perrette *et al.*, 2013). Esto ocurre porque las fluctuaciones del nivel del mar tienen tal nivel

de incertidumbre que es imposible predecir de manera exacta a que altura estará el nivel del mar cada año.

6.4.Importancia de las aplicaciones públicas online como herramientas de divulgación científica

Hacer llegar al público general los resultados de los trabajos científicos es, cada vez más, una prioridad importante en el desarrollo de proyectos científicos. La divulgación de los resultados científicos a la sociedad es de vital importancia para promover una sociedad consciente de los acontecimientos que les rodea, ya sea el cambio climático o los avances en la medicina, por ejemplo. Mediante la utilización de aplicaciones web de acceso público, como el creado en el presente estudio, se pretende dar a conocer a la población los resultados obtenidos para su consulta. Aun así, la divulgación de una manera comprensiva y sencilla es esencial para el correcto entendimiento por parte de la sociedad, siendo fundamental que esta entienda las limitaciones de los estudios. En el presente estudio, en particular, es indispensable que se comprenda que los resultados mostrados en la aplicación web son orientativos por las incertidumbres que el modelo aplicado presenta, y que su uso en temas de seguridad esta completamente desaconsejada por los peligros en seguridad humana que esto conllevaría.

Además, en la actual situación donde existe una generación de datos e información a gran escala, las aplicaciones web han tomado una gran importancia en la divulgación de dicha información. Estas aplicaciones permiten suministrar información de manera sencilla mediante el uso de internet, aunque siempre no se hace de manera pública. La publicación de la información de manera abierta, permitiría optimizar el uso de dinero público evitando la duplicidad de toma de datos, y mejoraría nuestra capacidad de reutilización de la información, ahorrando costes y tiempo que pueden ser empleados en avanzar más rápido o mejorar el conocimiento en otras áreas.

7. Conclusiones

En el presente estudio se han debatido las posibles implicaciones que puede tener el aumento del nivel del mar en las marismas de Urdaibai, en el País Vasco, así como su influencia en la vegetación halófitas del estuario, y en la resiliencia de las marismas. Las principales conclusiones obtenidas en este trabajo son:

- El área total de las marismas de Urdaibai se verá incrementada con el aumento del nivel del mar, independientemente de cuál sea el escenario. Además, los resultados indican que el estuario evolucionará hacia un sistema más dinámico donde la exposición al régimen mareal será mayor.
- Las especies de la marisma superior, en este caso *Juncus maritimus*, presentarán un aumento considerable de su superficie en cualquiera de los escenarios. Por el contrario, la evolución de la distribución de las especies *Spartina maritima* y *Halimione portulacoides* dependen del escenario y año proyectado. Esta evolución de las áreas de distribución de cada especie está sujeto a las condiciones específicas de la zona de estudio, por lo que los resultados no son extrapolables.
- La especie con mayor capacidad de adaptación al aumento del nivel del mar debido a sus características es *Halimione portulacoides*, con una deposición muy alta que facilita la colonización de esas áreas por *Juncus maritimus*. La más vulnerable, en cambio, es *Spartina maritima*. Esta última, además, ocupa las porciones más bajas de la marisma, lo que aumenta su riesgo de pérdida en casos donde su deposición no iguale o supere el aumento del nivel del mar.
- Reducir la incertidumbre en las predicciones de los efectos del aumento del nivel del mar en las marismas de Urdaibai requiere de una mayor disponibilidad de información de calidad. A este respecto, la fiabilidad aumentaría claramente si se dispusiera de información local de concentración de sedimento en los distintos hábitats diferenciados dentro de la marisma, si se aplicaran modelos hidrodinámicos espacio-explicitos para predecir los flujos de agua en las marismas en regeneración y reclamadas o si se dispusiera de información actualizada sobre la distribución actual y la productividad de las especies halófitas. Además, estudios sobre los mecanismos de sucesión aportarían información sumamente valiosa a la hora de aplicar este tipo de metodologías, pudiendo incluir la influencia de la competición entre especies en futuras investigaciones.

- La publicación de la información científica de manera abierta es un hito importante para mejorar la capacidad de predicción de los modelos, pudiendo ser los datos y resultados obtenidos en un estudio, reutilizados en otros y existiría un uso más eficiente de los fondos económicos.

8. Bibliografía

- Adam, P. (1990). *Saltmarsh ecology*. Edited by Adam, P. Cambridge university Press.
- Andrades-Moreno, L., Cambrollé, J., Figueroa, M. E., & Mateos-Naranjo, E. (2013). Growth and survival of *Halimione portulacoides* stem cuttings in heavy metal contaminated soils. *Marine Pollution Bulletin*, 75, pp. 28-32.
- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C. y Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological monographs*, 81 (2), pp. 169–193.
- Batriu, E., Pino, J., Rovira, P., y Ninot, J. M. (2011). Environmental control of plant species abundance in a microtidal Mediterranean saltmarsh. *Applied Vegetation Science*, 14, pp. 358-366.
- Benito, I. y Onaindia, M. (1991). Biomass and aboveground production of four angiosperms in Cantabrian (N. Spain) salt marshes. *Vegetatio*, 96, pp. 165-175.
- Best, Ü. S. N., Van der Wegen, M., Dijkstra, J., Willemsen, P. W. J. M., Borsje, B. W., y Roelvink, D. J. A. (2018). Do salt marshes survive sea level rise? Modelling wave action, morphodynamics and vegetation dynamics. *Environmental Modelling and Software*, 109, pp. 152-166.
- Boorman, L.A. (2003). Saltmarsh Review. An overview of coastal saltmarshes, their dynamic and sensitivity characteristics for conservation and management.
- Boscaiu, M., Ballesteros, G., Naranjo, M. A., Vicente, O., & Boira, H. (2011). Responses to salt stress in *Juncus acutus* and *J. maritimus* during seed germination and vegetative plant growth. *Plant Biosystems*, 145 (4), pp. 770-777.
- Bouma, T. J., van Belzen, J., Balke, T., van Dalen, J., Klaassen, P., Hartog, A. M., Callaghan, D. P., Hu, Z., Stive, M. J. F., Temmerman, S. y Herman, P. M. J. (2016). Short-term mudflat dynamics drive long-term cyclic salt marsh dynamics, *Limnology and Oceanography*, 61 (6), pp. 2261-2275.
- Castillo, J. M., Gallego-Tevar, B., Castellanos, E. M., Figueroa, M. E., y Davy, A. J. (2021). Primary succession in an Atlantic salt marsh: From intertidal flats to mid-marsh platform in 35 years. *Journal of Ecology*, 109 (8), pp. 2909-2921.

- Cearreta, A., García-Artola, A., Leorri, E., Irabien, M. J. y Masque, P. (2013). Recent environmental evolution of regenerated salt marshes in the southern Bay of Biscay: Anthropogenic evidences in their sedimentary record. *Journal of Marine Systems*, pp. 109-110.
- Chust, G., Á. Borja, A. del Campo, P. Liria, J. Franco, I. Muxika, R. Roa, J. G. Rodríguez, Joxe M. Garmendia (2013). Inundabilidad de los estuarios y costa de Bizkaia por ascenso del nivel del mar mediante LiDAR topográfico y batimétrico: cartografía y evaluación de impactos. Informe inédito elaborado por AZTI-Tecnalia para la Agencia Vasca del Agua - Uraren Euskal Agentzia, 37 pp.
- Curado, G., Rubio-Casal, A. E., Figueroa, E., & Castillo, J. M. (2014). Plant Zonation in Restored, Nonrestored, and Preserved *Spartina maritima* Salt Marshes. *Journal of Coastal Research*, 30 (3), pp. 629-634.
- Day, J. W., Christian, R. R., Boesch, D. M., Yáñez-Arancibia, A., Morris, J., Twilley, R. R., Naylor, L., Schaffner, L. & Stevenson, C. (2008). Consequences of climate change on the ecogeomorphology of coastal wetlands, *Estuaries and Coasts*, 31 (3), pp. 477-491.
- De la Hera, G. (2016). Modelado de la movilidad de metales pesados en zonas estuarinas. Aplicación para Pb y Zn en el estuario de Suances [Trabajo Fin de Máster, Universidad de Cantabria].
- Dirección de Medio Natural y Planificación Ambiental del Gobierno Vasco y Ihobe. (2014). Seguimiento científico del proyecto LIFE08NAT/E/000055 para la restauración de hábitats de interés comunitario en estuarios del País Vasco. Gobierno vasco e Ihobe.
- Donatelli, C., Zhang, X., Ganju, N. K., Aretxabaleta, A. L., Fagherazzi, S., y Leonardi, N. (2020). A nonlinear relationship between marsh size and sediment trapping capacity compromises salt marshes' stability. *Geology*.
- Duarte, C. M., Middelburg, J. J. y Caraco, N. (2005). Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, 2, pp. 1–8.
- El Aoula, R., Mhammdi, N., Dezileau, L., Mahe, G., & Kolker, A. S. (2021). Fluvial sediment transport degradation after dam construction in North Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 182, art. 104255.

- Fagherazzi, S., Marani, M. & Blum, L. K. (2004). Introduction: the Coupled Evolution of Geomorphological and Ecosystem Structures in Salt Marshes, in Fagherazzi, S., Marani, M. y Blum, L. K. (eds.) *The Ecogeomorphology of Tidal Marshes, Coastal Estuarine Study*. Washington DC: American Geophysical Union, pp 1-5.
- Fagherazzi, S., Kirwan, M. L., Mudd, S. M., Guntenspergen, G. R., Temmerman, S., D'Alpaos, A., Van de Koopel, J., Rybczyk, J. M., Reyes, E., Craft, C., & Clough, J. (2012). Numerical models of salt marsh evolution: ecological, geomorphic, and climatic factors. *Rev. Geophys.*, 50, RG1002.
- Feagin, R. A., Martinez, M. L., Mendoza-Gonzalez, G., & Constanza, R. (2010). Salt marsh zonal migration and ecosystem service change in response to global sea level rise: a case study from an urban region. *Ecology and Society*, 15 (4).
- Gallagher, J. L., Reimold, R. J., Linthurst, R. A. y Pfeiffer, W. J. (1980). Aerial production, mortality, and mineral accumulation-export dynamics in *Spartina alterniflora* and *Juncus roemerianus* plant stands in a Georgia salt marsh. *Ecology*, 61 (2), pp. 303-312.
- García-Artola, A., Cearreta, A. y Leorri, E. (2011). Cambios en el nivel marino y transformación ambiental del estuario de la Reserva de la Biosfera de Urdaibai (País Vasco, España) durante el Holoceno y Antropoceno. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol.*, 105 (1-4), pp. 45-51.
- Hill, TD, & Roberts, BJ. (2017). Effects of seasonality and environmental gradients on *Spartina alterniflora* allometry and primary production. *Ecol Evol.*, 7, pp. 9676–9688. <https://doi.org/10.1002/ece3.3494>
- Huang, L., Bai, J., Gao, H., Xiao, R. Liu, P. y Chen, B. (2012). Soil organic carbon content and storage of raised field wetlands in different functional zones of a typical shallow freshwater lake, China. *Soil research*, 50, pp. 664-671.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.

- Ivajnić, D., Šajna, N., & Kaligarič, M. (2016). Primary succession on re-created coastal wetland leads to successful restoration of coastal halophyte vegetation. *Landscape and Urban Planning*, 150, pp. 79-86.
- Kirwan, M. L. y Murray, A. B. (2007). A coupled geomorphic and ecological model of tidal marsh evolution. *PNAS*, 104 (15), pp. 6118–6122. DOI: 10.1073/pnas.0700958104.
- Kirwan, M. L., Guntenspergen, G. R., D'Alpaos, A., Morris, J. T., Mudd, S. M., y Temmerman, S. (2010). Limits on the adaptability of coastal marshes to rising sea level. *Geophysical Research Letters*, 37, L23401.
- Kirwan, M. L. y Megonigal, J. P. (2013). Tidal wetland stability in the face of human impacts and sea-level rise, *Nature*, 504 (7478), pp. 53-60.
- Kirwan, M. L., Temmerman, S., Skeechn, E. E., Guntenspergen, G. R. y Fagherazzi, S. (2016). Overestimation of marsh vulnerability to sea level rise. *Nature Climate Change*, 6 (3), pp. 253-260.
- Langley, J. A., McKee, K. L., Cahoon, D. R., Cherry, J. A. y Megonigal, J. P. (2009). Elevated CO₂ stimulates marsh elevation gain, counterbalancing sea-level rise. *PNAS*, 106 (15), pp. 6182–6186.
- Leorri, E., Cearreta, A., García-Artola, A., Irabien, M. J., y Blake, W. H. (2013). Relative sea-level rise in the Basque coast (N Spain): Different environmental consequences on the coastal area. *Ocean y Coastal Management*, 77, pp. 3-13.
- Linhurst, R. A. y Reimold, R. J. (1978). Estimated net aerial primary productivity for selected estuarine angiosperms in Maine, Delaware, and Georgia. *Ecology*, 59 (5), pp. 945-955.
- Mariotti, G., y Fagherazzi, S. (2010). A numerical model for the coupled long-term evolution of salt marshes and tidal flats. *Journal of Geographical Research*, 115.
- Mcleod, E., Chmura, G., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock C. E., Schlesinger, W. H. y Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Front Ecol Environ*, 9(10), pp. 552–560.

- Mcowen C, Weatherdon LV, Bochove J, Sullivan E, Blyth S, Zockler C, Stanwell-Smith D, Kingston N, Martin CS, Spalding M, Fletcher S (2017). A global map of saltmarshes (v6.1). *Biodiversity Data Journal*, 5.
- Menéndez, M. (2008). Leaf growth, senescence and decomposition of *Juncus maritimus* Lam. in a coastal Mediterranean marsh. *Aquatic Botany*, 89, pp. 365-371.
- Morris, J. T., Sundareshwar, P. V., Nietch, C. T., Kjerfve, B. and Cahoon, D. R. (2002). Responses of coastal wetlands to rising sea level, *Ecology*, 83 (10), pp. 2869-2877.
- Morris, J. T. (2007). Ecological engineering in intertidal saltmarshes. *Hydrobiologia*, 577, pp. 161-168.
- Pennings, S. C., y Callaway, R. M. (1992). Salt marsh plant zonation: the relative importance of competition and physical factors. *Ecology*, 73 (2), pp. 681-690.
- Peralta, G., Van Duren, L.A., Morris, E.P., & Bouma, T.J. (2008). Consequences of shoot density and stiffness for ecosystem engineering by benthic macrophytes in flow dominated areas: A hydrodynamic flume study. *Marine Ecology Progress Series*, 368, pp. 103–115.
- Perillo, G. M. E., Wolanski, E., Cahoon, D. R. y Hopkinson, C. S. (2019). *Coastal wetlands. An integrated ecosystem approach*. Elsevier
- Perrette, M., Landerer, F., Riva, R., Frieler, K., & Meinshausen, M. (2013). A scaling approach to project regional sea level rise and its uncertainties. *Earth Syst. Dynam.*, 4, pp. 11–29.
- Puertos del Estado. (2019). Resumen de parámetros relacionados con el nivel del mar y la marea que afectan a las condiciones de diseño y explotación portuaria. Área de Medio Físico.
- Raw, J. L., Riddin, T., Wasserman, J., Lehman, T. W. K., Bornman, T. G., y Adams, J. B. (2020). Salt marsh elevation and responses to future sea-level rise in the Knysna Estuary, South Africa. *African Journal of Aquatic Science*, 45 (1), pp. 1-16.
- Redelstein, R., Coners, H., Knohl, A. y Leuschner, C. (2018). Water sources of plant uptake along a salt marsh flooding gradient. *Oecologia*, 188, pp. 607-622.

- Rivas, V. y Cendrero, A. (1991). Use of Natural and Artificial Accretion on the North Coast of Spain: Historical Trends and Assessment of some Environmental and Economic Consequences. *Journal of Coastal Research*, 7 (2), pp. 491-507.
- Roman, C. T. (2001). Salt Marsh Vegetation, in Steele, J. H. (ed.) *Encyclopedia of Ocean Sciences* (Second Edition), pp. 39-42.
- Sainz de Murieta, E. (2016). Environmental and economic impacts of sea-level rise on the Basque Coast [Tesis de Doctorado, Universidad del País Vasco]. Archivo Digital de Docencia e Investigación.
- Sainz de Murieta, E., Abadie, L. M. y Galarraga, I. (2018). Aumento del nivel del mar en la costa vasca: una aproximación probabilística. *Ekonomiaz*, 94 (2º semestre).
- Schile LM, Callaway JC, Morris JT, Stralberg D, Parker VT, et al. (2014) Modeling Tidal Marsh Distribution with Sea-Level Rise: Evaluating the Role of Vegetation, Sediment, and Upland Habitat in Marsh Resiliency. *PLoS ONE* 9(2).
- Sullivan, M., Davy, A. J., Grant, A., y Mossman, H. L. (2018). Is saltmarsh restoration success constrained by matching natural environments or altered succession? A test using niche models. *Journal of Applied Ecology*, 55 (3), pp. 1207-1217.
- Spalding M, Kainuma M, Collins L (2010). World Atlas of Mangroves (version 3.1). A collaborative project of ITTO, ISME, FAO, UNEP-WCMC, UNESCO-MAB, UNU-INWEH and TNC. London (UK): Earthscan, London. p. 319.
- Turner, R. K. y Schaafsma, M. (2015). *Coastal Zones Ecosystem Services. From Sciences to Values and Decision Making*. Springer.
- Vázquez-Pinillos, F. J., y Marchena-Gómez, M. J. (2021). Territorial impacts of sea-level rise in marsh environments. The case of the Bay of Cádiz, Spain. *Geographical Research Letters*, 47 (2), pp. 523-543.
- Wang, C. H., Lu, M., Yang, B., Yang, Q., Zhang, X. D., Hara, T., & Li, B. (2010). Effects of environmental gradients on the performances of four dominant plants in a Chinese saltmarsh: implications for plant zonation. *Ecological Research*, 25 (2), pp. 347-358.

9. Anexos

9.1. Anexo I: Imágenes georreferenciadas de las marismas de Urdaibai

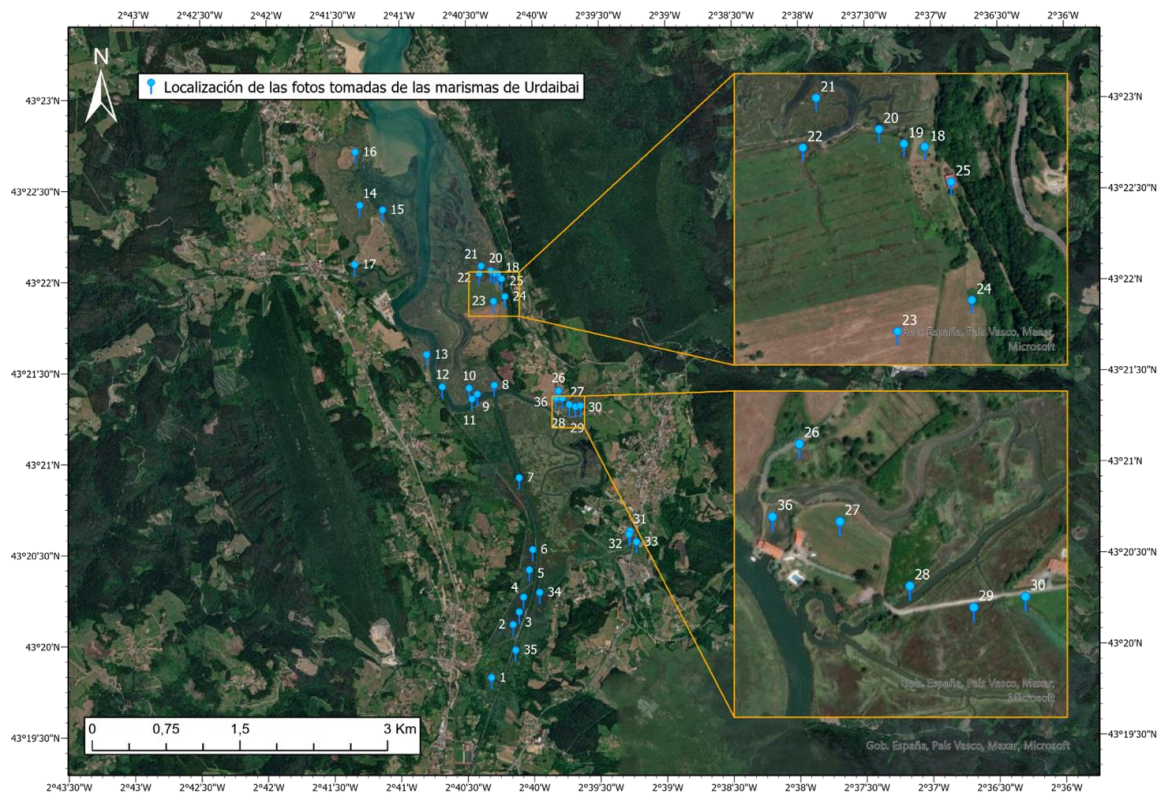


Figura 1.1. Localización de las fotos tomadas de las marismas de Urdaibai (Fuente: elaboración propia a partir de la localización obtenida mediante Collector for ArcGIS).



Figura 1.2. Fotografías de los distintos puntos del estuario.



Figura 1.3. Fotografías de los distintos puntos del estuario.



Figura 1.4. Fotografías de los distintos puntos del estuario.

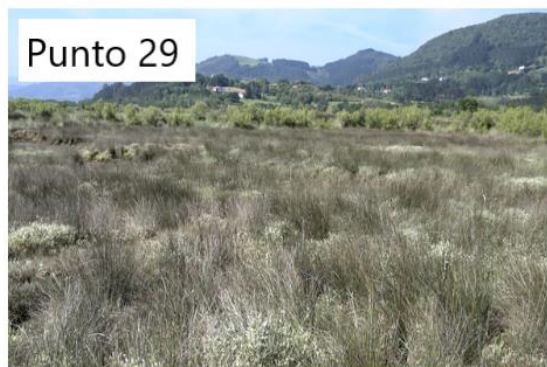
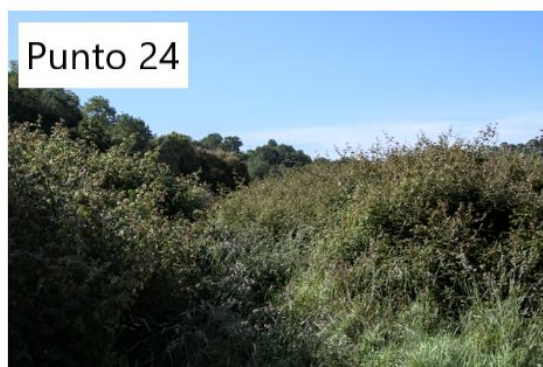


Figura 1.5. Fotografías de los distintos puntos del estuario.

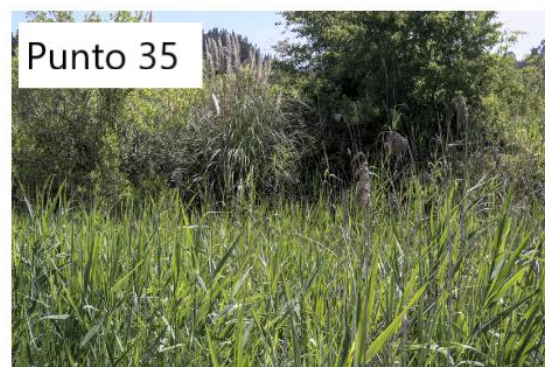
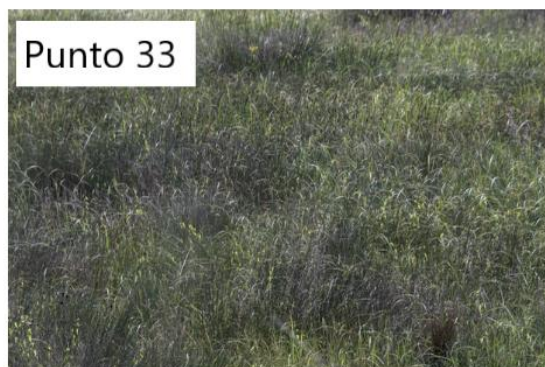


Figura 1.6. Fotografías de los distintos puntos del estuario.

9.2. Anexo II: Elevaciones más frecuentes de los distintos elementos de las marismas de Urdaibai

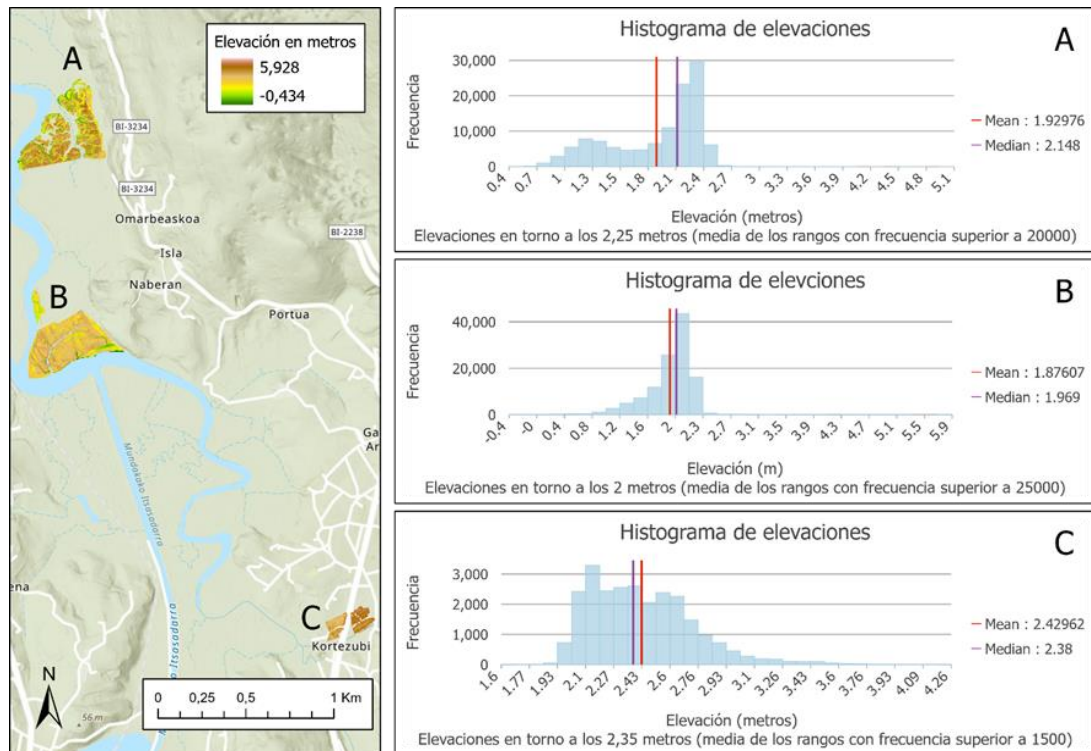


Figura 2.1. Elevaciones más frecuentes de las marismas naturales de Urdaibai colindantes a las marismas en regeneración.

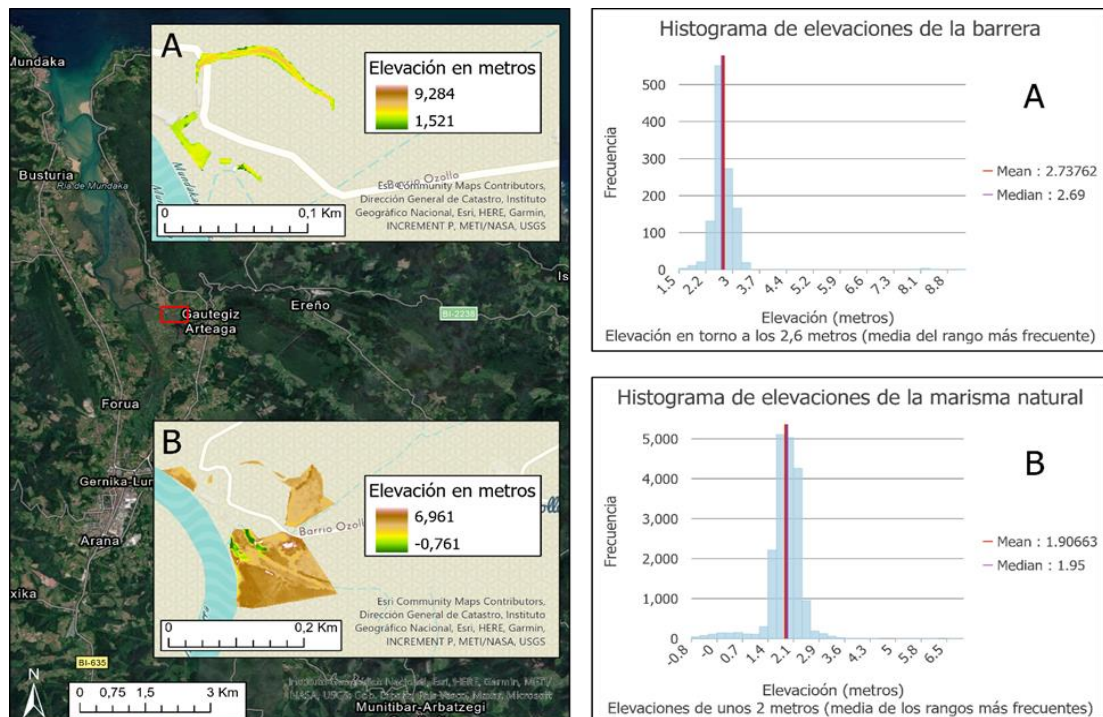


Figura 2.2. Elevaciones más frecuentes de la marisma natural colindante y de la barrera que impide que se inunde la marisma reclamada.

9.3. Anexo III: Deposición en metros de las especies halófitas presentes en las marismas de Urdaibai

Tabla 3.1. Deposición en metros de las especies *Spartina maritima*, *Halimione portulacoides* y *Juncus maritimus* en las marismas de Urdaibai atendiendo a diferentes escenarios de cambio climático y fechas

(Fuente: elaboración propia).

Espece	RCP 4.5 2050	RCP 8.5 2050	RCP 4.5 2100	RCP 8.5 2100	Rango de elevaciones (m)
<i>Spartina maritima</i>	0,2969	0,2993	0,7562	0,7884	0,87-0,97
	0,2792	0,2816	0,7175	0,7497	0,97-1,07
	0,2616	0,2639	0,6788	0,711	1,07-1,17
	0,2439	0,2462	0,6401	0,6723	1,17-1,27
<i>Halimione portulacoid es</i>	0,5236	0,5293	1,1774	1,2491	1,27-1,37
	0,4829	0,4886	1,1042	1,1759	1,37-1,47
	0,4422	0,4479	1,0311	1,1028	1,47-1,57
	0,4015	0,4072	0,9579	1,0296	1,57-1,67
<i>Juncus maritimus</i>	0,4713	0,4789	1,0583	1,1501	1,67-1,77
	0,4184	0,426	0,9733	1,0651	1,77-1,87
	0,3655	0,3731	0,8884	0,9802	1,87-1,97
	0,3126	0,3202	0,8034	0,8952	1,97-2,07
	0,2597	0,2673	0,7185	0,8103	2,07-2,17
	0,2065	0,2144	0,6335	0,7253	2,17-2,27
	0,1538	0,1615	0,5486	0,6404	2,27-2,37
	0,1009	0,1086	0,4636	0,5554	2,37-2,47